

低コストIMUとドップラソナーを用いた複合航法に関する基礎的研究

著者	八田 大典
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00002088/

修士学位論文

低コスト IMU とドップラソナーを用いた
複合航法に関する基礎的研究

2020 年度
(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

八田 大典

目次

第 1 章 序文	1
1.1 研究背景	1
1.2 GNSS の脆弱性	2
1.2.1 ジャミング	2
1.2.2 スプーフィング	2
1.2.3 ミーコニング	3
1.3 本研究の目的	3
第 2 章 使用した各センサの特徴	4
2.1 GNSS	4
2.1.1 RTK とは	5
2.2 IMU	6
2.2.1 IMU の問題点	8
2.2.2 船舶上での ZUPT の問題点	10
2.3 ドップラソナー	13
第 3 章 複合航法	15
3.1 デッドレコニングとは	15
3.2 方位推定	15
3.2.1 IMU のみを使用した方位推定	15
3.2.2 GNSS/IMU とカルマンフィルタを利用した方位推定	15
3.3 速度推定	16
3.3.1 IMU による速度推定	16
3.3.2 ドップラソナーによる速度推定	16
3.3.3 カルマンフィルタによる速度のスムージング	17

3.4 位置推定	18
第 4 章 実験	20
4.1 実験概要	20
4.2 実験結果	23
4.2.1 方位推定結果	23
4.2.2 速度推定結果	24
4.2.3 位置推定結果	26
4.2.4 GNSS/IMU カルマンフィルタ方位を利用した場合の位置推定結果	29
4.2.4 ZUPT とエラーチェックの効果検証	31
4.2.5 初期バイアス推定値を増減させた場合の累積誤差	33
4.2.6 初期バイアスと ZUPT エラーチェックの閾値の関係	34
4.3 まとめ	35
第 5 章 結論	36
5.1 結論	36
5.2 今後の課題	36
参考文献	37
図表リスト	38
謝辞	39

第 1 章 序文

1.1 研究背景

近年、GNSS (Global Navigation System) の精度向上に伴って様々な分野で高精度測位を利用した新たな技術を開発することが期待されている。^{(1)~(4)}既に海洋技術では自動運航船、次世代 AIS、GNSS 津波計、ダイナミックポジショニングといった諸技術への活用が行われている。特に日本では米国の GPS の補間・高精度化を目的として準天頂衛星”みちびき”の打ち上げを行っており、みちびきの放送する補正情報に対応する受信機さえあれば安価で高精度な位置情報を手軽に利用することが可能になりつつある。内閣府の運営しているみちびき公式サイトによれば、みちびきを利用した高精度測位は既に波高計測ブイ、プレジャーボートの自動着棧といった分野での利活用が始まっている。しかし、GNSS は衛星から放送される電波を利用して測位を行うため、使用帯域を狙ったジャミング・スプーフィング・ミーコニングといった悪意ある電波を使用した攻撃に対して脆弱性を抱えており、実際にシリアや北朝鮮、韓国といった紛争地域では軍事目的でジャミングやスプーフィングが行われていることが明らかになっている。⁽⁵⁾この脆弱性を解消するために様々な研究が行われている。GNSS 以外の測位センサには RLG (Ring Laser Gyro) や FOB (Fiber Optic Gyro) といった高精度かつ外部情報を使用しない慣性航法システムもあるが、非常に高価なため一般的な船舶には搭載されていない。そこで本研究で一般的な船舶上に搭載可能な MEMS IMU (Micro Electro Mechanical Systems Inertial Measurement Unit) やドップラソナーといったセンサを利用した複合航法を提案、本学の実習船”汐路丸”に各センサを搭載して実験を行い提案手法の精度について基礎的研究を行った。

準天頂衛星みちびきの活用例：



図 1 “みちびき”を利用した波高計測ブイ



図 2 プレジャーボートの自動着棧

出典:みちびきウェブサイト

図 1:https://qzss.go.jp/usage/userreport/esl_200217.html

図 2:https://qzss.go.jp/usage/userreport/njmk_200518.html

1.2 GNSS の脆弱性

1.2.1 ジャミング

ジャミングとは GNSS と同じ周波数帯に対して妨害電波を放射することで GNSS による測位そのものを利用不可能にする妨害手法である。GNSS 信号は高度 2 万 km の衛星から放送されているため、同じ周波数帯に対して地上から妨害信号を流すだけで長距離を飛来して信号強度の低い GNSS 信号を塗りつぶしてしまうことが可能である。この現象は同じ周波数帯を使用する他の電波機器によって引き起こされる場合もあり、様々な電波機器を使用する船舶では特に注意が必要である。一方で、悪意ある攻撃としてジャミングが行われた場合は受信機が大きな信号強度のノイズ状信号を受け取るため攻撃の検出は比較的容易である。また、違法な GPS ジャマーが Amazon や merucari といった通販サイトで購入可能であり、トラック運転手が位置情報をごまかすために購入して使用したところ付近の空港で GPS が利用不可能になったというような問題が発生したことも報告されている。

1.2.2 スプーフィング

スプーフィングとは公開されている GNSS 信号の仕様と全く同じなりすまし信号を生成、その信号を放射することで GNSS 受信機を騙し、誤った測位解を得るように誘導する技術である。地上から放送されるスプーフィング信号は本物の GNSS 信号よりも高い信号強度を持っているため、GNSS 受信機はより高い信号強度の信号を利用しようとして騙されてしまう。また、ジャミングとは異なり

全く同一仕様の信号が放送されているため信号強度のみではその正誤を判定することはできず、妨害者の意図した測位解を与えることができるという意味で特に危険な妨害手法でもある。仮に船舶の受信機が完全にスプーフィングによって乗っ取られた場合、オートパイロットや AIS には誤った位置が与えられてしまうため衝突や座礁の危険がある。そのためスプーフィングは現在最も危険視されている妨害手法となっている。

1.2.3 ミーコニング

ミーコニングとは通常の GNSS 信号を受信して記録し、時間差をつけて再放送することによって GNSS 受信機に誤った測位解を与える妨害手法である。これはスプーフィングと同様になりすましの一種であるが、実際の信号を再放送するので過去の受信信号との比較・照合することによって検出が可能といわれている。また、意図した位置に測位解をずらすわけではないため、危険性はスプーフィングほどではない。一方で、信号を自分で生成するスプーフィングに比べて記録・再放送するだけで容易に妨害信号を生成することができるという点が大きな問題となっている。

1.3 本研究の目的

一般的にトンネル内部や短時間の妨害によって GNSS の精度が低下または利用できない区間を補間するシステムとして加速度・角速度センサを用いて積分によって現在位置を算出する慣性航法装置、INS(Inertial Navigation System)が既に用いられている。慣性航法では正確な方位推定が必要不可欠だが、RLG の FOG といった高精度ジャイロセンサを搭載した INS は非常に高価なシステムであることから一般的な船舶への搭載は難しい。そこで、本研究では廉価な MEMS IMU と船舶に元々搭載されているドップラソナーを活用して推測航法アルゴリズムを実装した。しかし、ドップラソナーで得られる速度には原因不明の飛びが含まれることがあり、IMU には加速度や角速度の積分によって速度・姿勢・位置を求めるため時間経過に応じて誤差が蓄積していくという問題がある。そのため廉価な MEMS IMU のみを利用した慣性航法の場合誤差は 60 秒で数十[m]といわれている。先行研究ではドップラソナー速度の誤差と IMU で推定した方位のバイアスを取り除くことができず、時間経過に応じて大きな誤差が発生してしまった。⁽⁶⁾そこで、本研究では速度の誤差蓄積を解消するために、GNSS 及び INS の代替として船舶に搭載されているドップラソナーと低コスト MEMS IMU を利用して、速度はカルマンフィルタ方位で飛びのスムージングを行い、方位推定のために角速度のバイアス除去にいくつかの工夫を施した測位補間システムを構築して GNSS が利用不可能な場合でも測位を継続することを目指した。なお、国際海事機関(IMO)では GNSS の様な電波航法機器を利用した測位精度として外洋で 100[m]以内という基準を要求している。⁽⁷⁾この基準はあくまで電波航法機器に対する基準であるため時間経過に応じて誤差が蓄積することは考慮されていない。一方で IMU を利用した推測航法では時間経過に応じて誤差が蓄積するという問題があるので、本研究では時間を 1 時間に絞って最大測位誤差 100[m]以内を目標値とした。

第2章 使用した各センサの特徴

2.1 GNSS

本研究ではTrimble SPS855(図3)と東京海洋大学第四実験棟屋上に設置されたTrimble NetR9(図4)との間でRTK(Real Time Kinematic)と呼ばれる高精度測位を実施した。通信や衛星配置が良好な場所で測定した場合は誤差数センチメートルで現在位置を得ることができる。本研究ではこのRTKによって取得した速度・方位・位置情報をIMU/ドップラソナー複合航法との比較基準データとして利用した。



図 3 SPS855

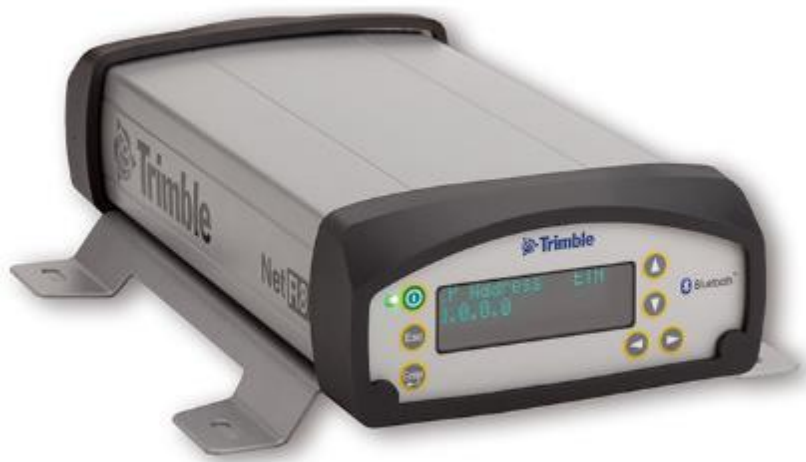


図 4 NETR9

2.1.1 RTK とは

GNSS による測位には対流圏遅延、電離層遅延、クロック誤差、衛星軌道誤差といった様々な誤差要因がある。これらの誤差を取り除くことができれば測位精度を向上させることができるため、これらの誤差要因(図 5)を取り除くために様々な手法が提案されてきた。RTK では GNSS 信号を運ぶ搬送波の位相を利用して衛星-アンテナ間の距離を測定する。搬送波は 1 波長が 19[cm]であるためその位相を観測するだけで衛星と受信機間の距離を正確に計測することが可能となる。しかし、ここで観測した搬送波には図 5 に示したような誤差要因も含まれている。そこで、それらの誤差を打ち消すために移動体に設置する受信機の他に基準局と呼ばれる精密位置がわかっている別の GNSS 受信機が必要となる。この二つの受信機をそれぞれ Rover (移動局) と Reference (基準局) と呼ぶ。この 2 つの受信機が利用するアンテナ間の距離(基線長)が十分に近ければ、二つの受信機が観測した位相の二重位相差を取ることで電離層遅延、クロック誤差、対流圏遅延、衛星軌道誤差といった主要な誤差要因を取り除くことが可能となり、測位精度を数 cm レベルに向上することができる。通常、船舶は陸地から遠く離れた場所を航行するため基線長によって大きく精度が変動する RTK を利用することは少ないが、本研究では東京湾内で実験を行ったため、最も精度が高く安定して利用できる RTK を比較基準値として利用した。静止状態で RTK を行った場合の測位精度は基準局との通信が良好かつオープンスカイ環境であれば誤差数 cm となる。本研究で用いた受信機と同一の受信機を使用して静止状態で RTK を行った際の水平誤差プロットを図 6 に示す。

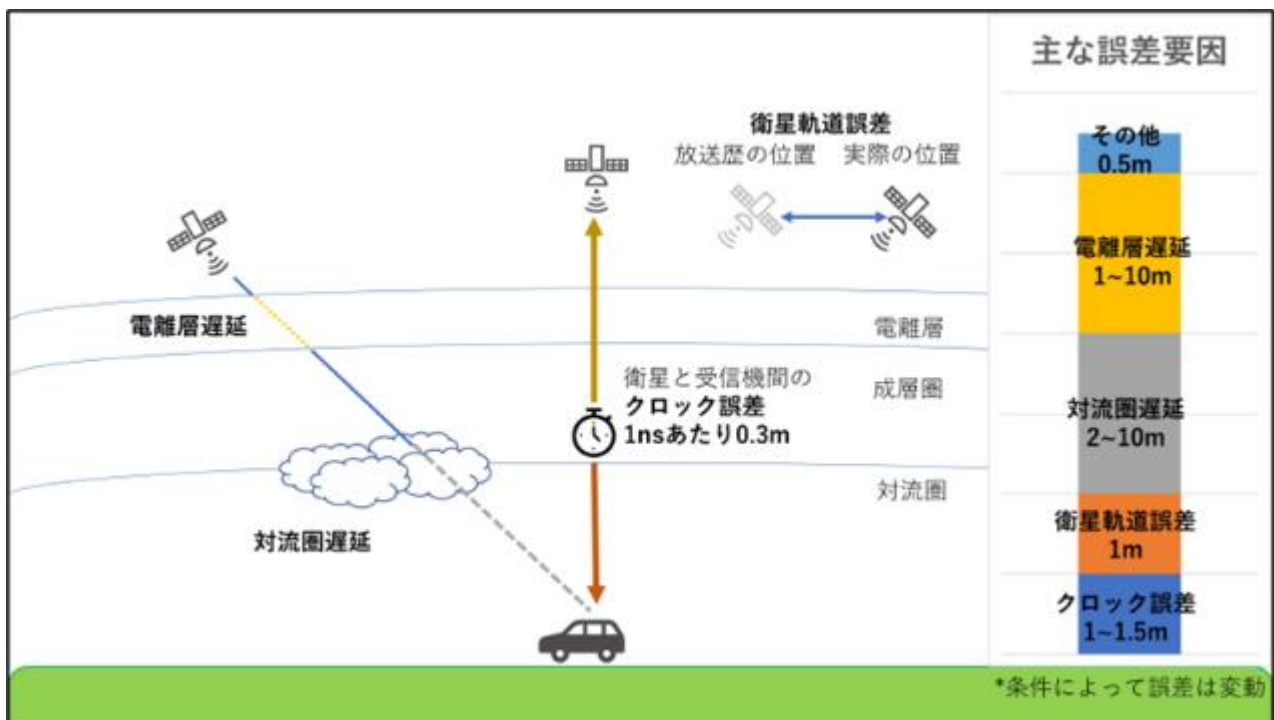


図 5 GNSS 誤差要因

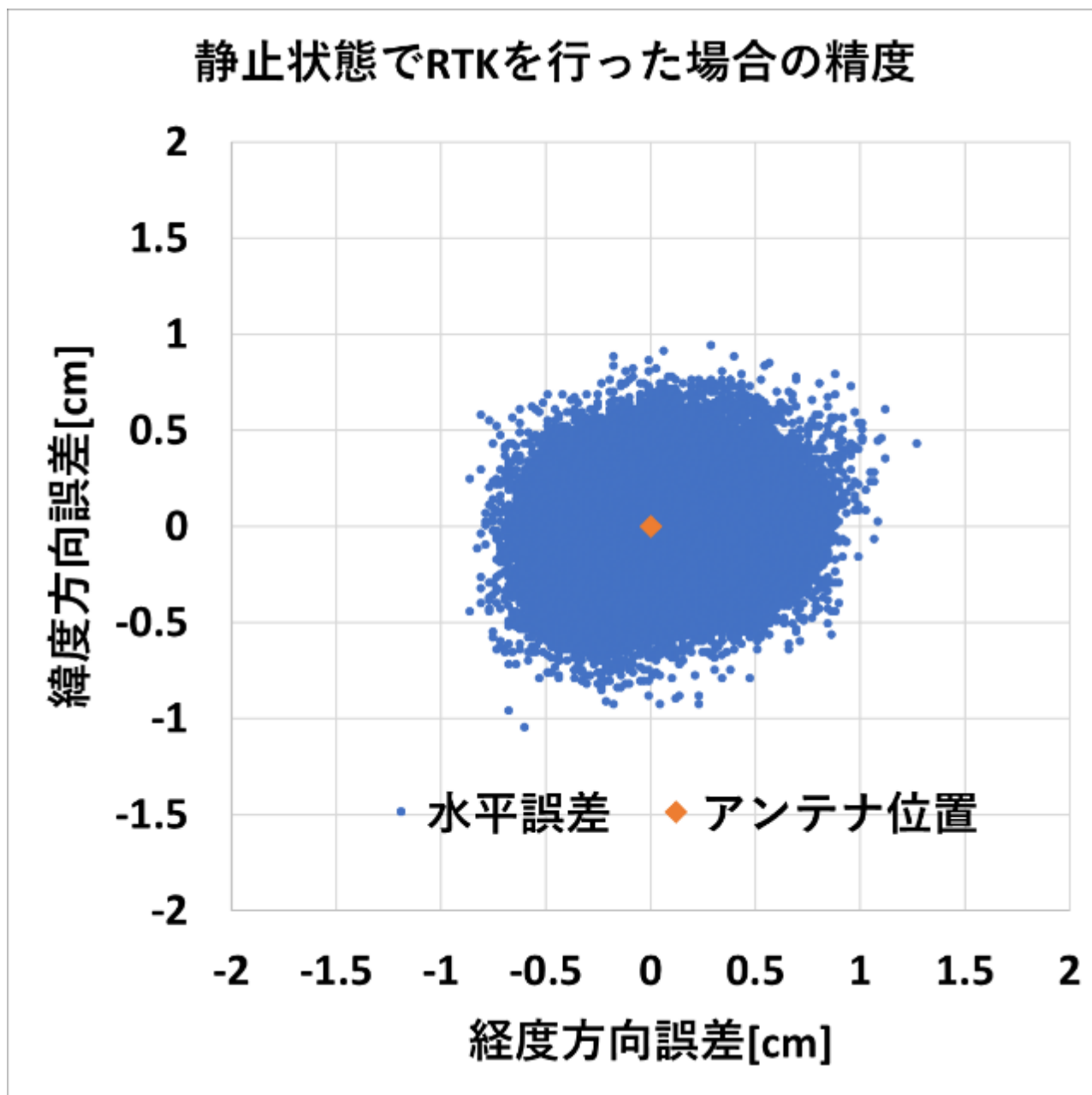


図 6 静止状態で RTK を行ったばあいの測位精度

2.2 IMU

MEMS IMU には軍用、産業用、民間用といった価格と性能に応じてグレードがあり、ある有名メーカーの軍用 IMU であっても GNSS の補助がない場合 30 秒で 2[m] の累積誤差が発生する。GNSS 欠損時にはバイアスが時間経過に応じて蓄積し、位置の累積誤差も指数関数的に増大するため長期にわたって測位を行うにはこのバイアスを取り除く必要がある。本研究では可能な限り廉価にシステムを構築するため民間グレードの東京航空計器製の CSM MG-100 と呼ばれる IMU を利用した。使用した IMU の外観を図 7 に示す。この IMU は GNSS と時刻情報を同期して加速度・角速度・地磁気・センサ温度・気圧等を 100Hz 周期で取得することが可能であり、本実験では図 8 の様に船首方向を X 軸、それに垂直な右舷方向を Y 軸、鉛直下向きを Z 軸として IMU を設置した。IMU の諸元を表また、本 IMU は使用目的に応じて測定レンジを変更することが可能だが、本研究では一般的に車等に用いられる Low Range を利用した。High Range、Low Range での検出範囲や精度について IMU の詳細な

諸元を表1にまとめる。本研究で用いた IMU のカタログスペックでは加速度精度が $\pm 0.01[m/sec^2]$ 、角速度精度が $\pm 0.1[deg/sec]$ となる。

表 1 IMU 諸元

性能		検出範囲	精度
3軸加速度	Low Range	$\pm 29.42m/s^2$ ($\pm 3G$)	$\pm 0.01m/s^2$ (within $\pm 9.8m/s^2$)
	High Range	$\pm 58.840m/s^2$ ($\pm 6G$)	$\pm 0.5m/s^2$, for reference
3軸角速度	Low Range	± 5.23598 rad/s($300^\circ/s$)	$\pm 0.00175rad/s$ ($\pm 0.1^\circ/s$)
	High Range	± 15.70796 rad/s($900^\circ/s$)	$\pm 0.01745rad/s$ ($\pm 1.0^\circ/s$), for reference
姿勢角度	Low Range	$-180.00\sim 179.99^\circ$	$\pm 0.2^\circ$ (Low Range Sensor Selected)
	High Range	$\pm 90^\circ$	
方位角	-	$0.00\sim 359.99^\circ$	-
位置	Lat	$\pm 90.0000^\circ$	3.0m RMS or Less
	Lon	$-180.0000\sim 179.9999^\circ$	
	Altitude	$-600\sim 9000m$	
3軸速度		$\pm 250m/s@each\ axis$	0.3m/s RMS or less



図 7 CSM MG-100

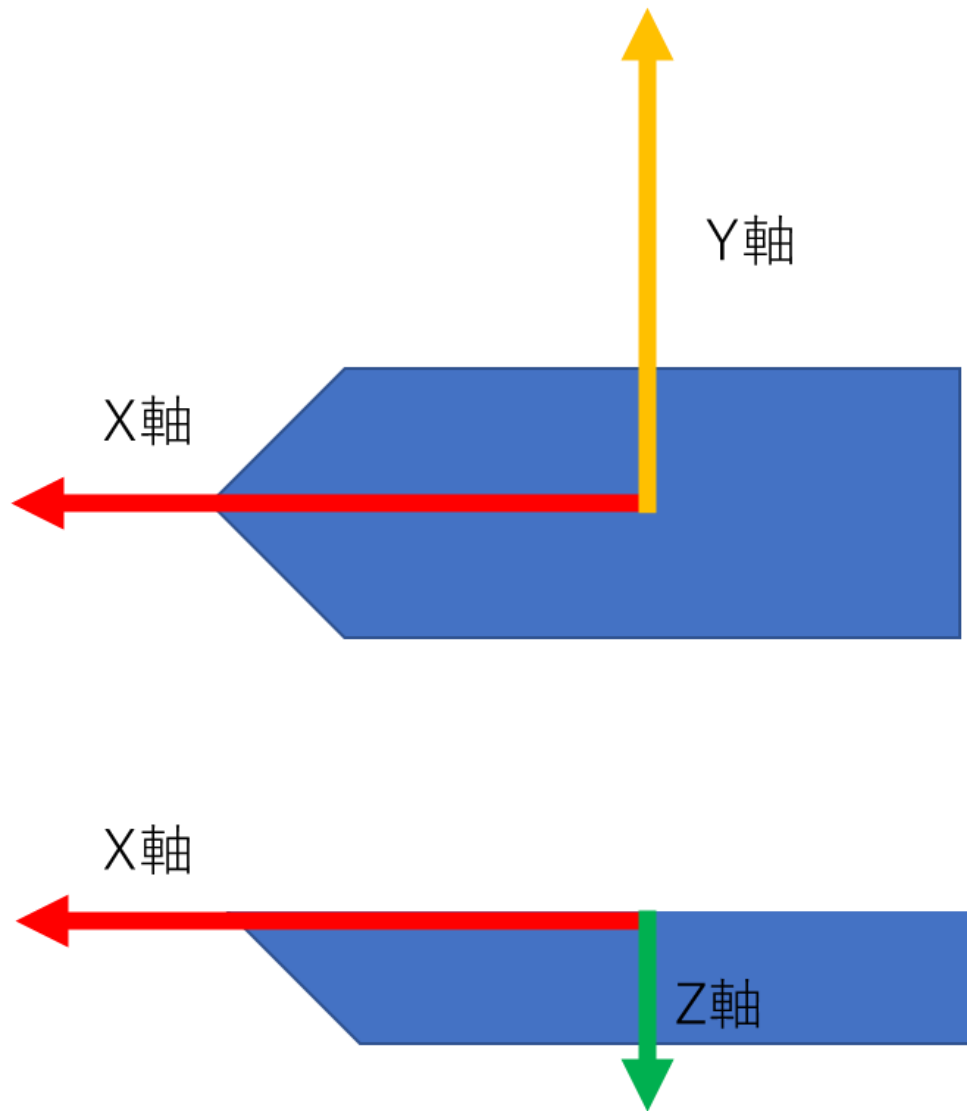


図 8 IMU 設置軸

2.2.1 IMU の問題点

IMU で測定される加速度や角速度は完全静止状態で測定した場合でも基盤温度やその他の要因によってゼロ点がずれる。この誤差をバイアスと呼び、角速度を積分することで速度・方位を推定する時にバイアスが含まれた値を積分していくと時間経過で誤差が蓄積していく。そこでこの誤差蓄積を防ぐために静止時の移動平均を計算して取り除く ZUPT (Zero Velocity Update) と呼ばれる処理を行って補正を行う。静止状態で Z 軸回り角速度を 1 時間測定した結果と 60 秒間毎の移動平均、ZUPT (移動平均) で補正した角速度を図 9 に示す。青が実測値、オレンジがその移動平均、灰色が実測値を移動平均分オフセットした値となる。また、補正していない角速度と ZUPT で補正した角速度を積分した場合の結果を図 10 に示す。実測値を積分した場合が青、ZUPT によって修正した値を積分した場合がオレンジとなり、補正しなかった場合で $0.002[\text{rad/sec}]$ のバイアスが発生し続けており 1 時間で 400 度以上の大きな誤差となるが、静止状態であれば ZUPT によって補正を行うことで誤差 2~3 度で方位推定をすることが可能となる。

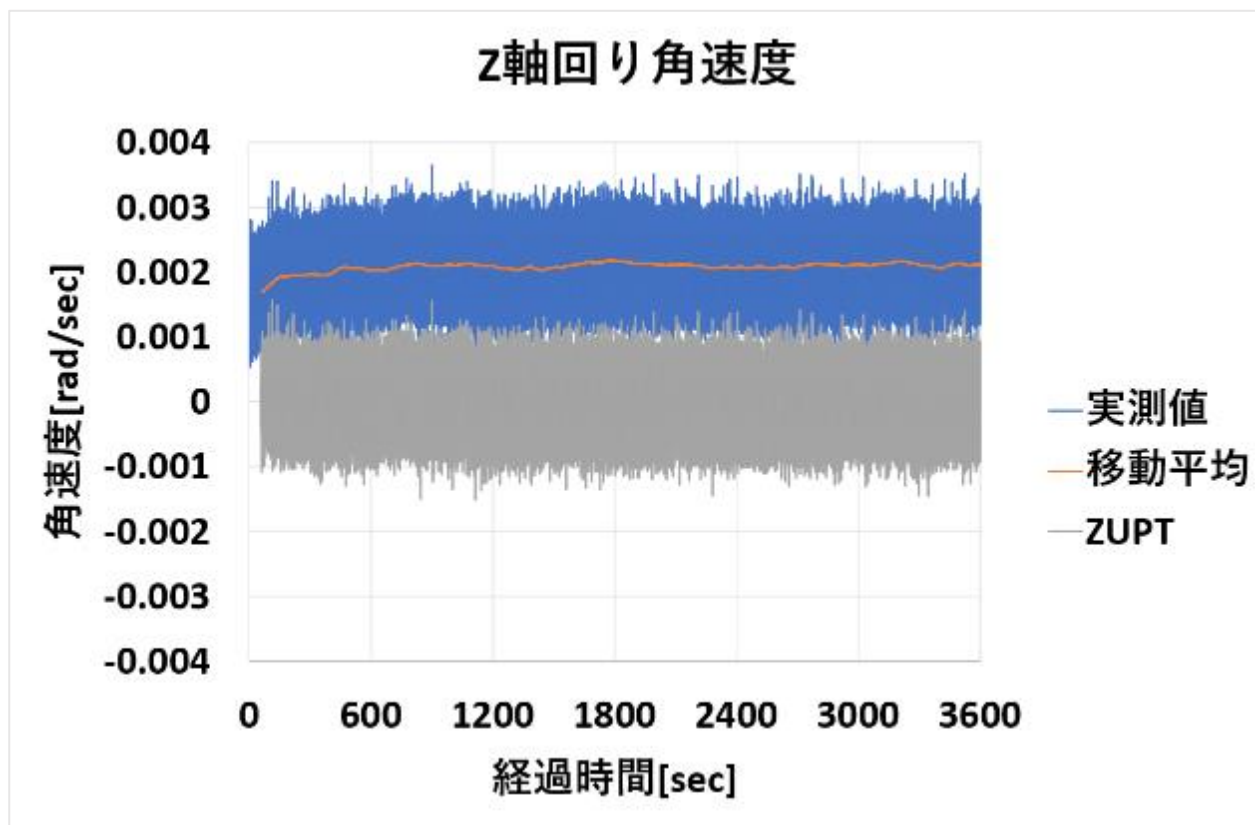


図 9 静止状態でのバイアス補正

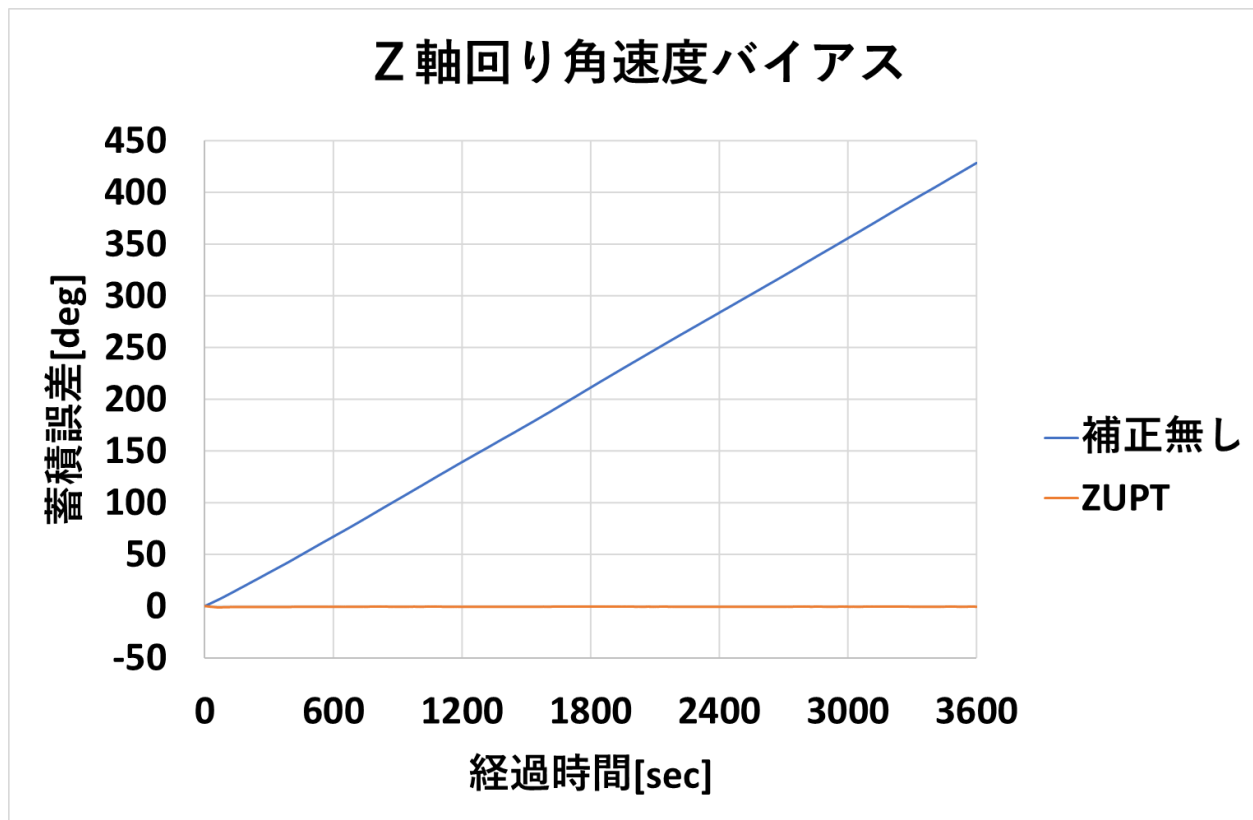


図 10 蓄積誤差の低減

2.2.2 船舶上での ZUPT の問題点

2.2.1 で示したように ZUPT の効果は非常に高いが、基本的に静止状態で行うことを前提としているため常に動揺がおこる船舶上では正確にバイアスを推定することが難しいという問題がある。そこで本研究では ZUPT を行う際にいくつかの条件付けを行った。まず、時刻 t に IMU で観測した角速度を ω_t とする。この角速度にはバイアス、動揺によって発生した動的角速度、センサの観測ノイズが含まれている。まずバイアスを取り除くために実験前の等速直進航行中に測定した角速度の平均値を初期バイアスとして取り除く。この初期バイアスを取り除いてオフセットした角速度を ω'_t とする。バイアスは時間経過によるランダムウォークや温度変化等で変化するため、初期バイアス除去後の角速度 ω'_t には微細なバイアスが残存している。そこで残ったバイアス成分を取り除くために ZUPT を実施する。この ZUPT は直進中のみ行うこととし、事前に直進区間で測定した角速度の標準偏差を閾値として用いることで旋回時の様な一定角速度以上の値が発生している場合は ZUPT に含めないようにする。よって閾値の条件を式で表すと $|\omega'_t| < 0.2188[\text{deg/sec}]$ となる。条件を満たした場合は変数 sum に積算していき、バイアス推定値を B として積算回数 6000 回毎に $B = \text{sum}/6000$ でバイアス推定値を更新する。最後に 1 回前のバイアス推定の結果 B' と現在のバイアス推定結果 B を比較して推定値が外れ値ではないかエラーチェックを行う。このエラーチェックの条件は $|B' - B| < 0.05[\text{deg/sec}]$ とする。本研究で用いた条件を以下に列記し、そのフローチャートを図 11 にまとめる。先行研究⁽⁵⁾において利用されていた従来手法では事前の直進区間のデータを利用して計算した初期バイアス除去のみを行ってから積分していたが、新手法では ZUPT と ZUPT のエラーチェックを加えたことが大きな違いとなる。

条件

- 1, 初期バイアスの除去(実験開始前の直進区間の平均値で角速度をオフセットする)
- 2, 一定以上の角速度を検出した場合は平均を取る値に含めない
- 3, ZUPT のエラーチェックを行い、異常値は弾いて前の ZUPT 結果を使う

注:ただし加速度については角速度よりも ZUPT が難しいため 1 の初期バイアス補正のみ行う。

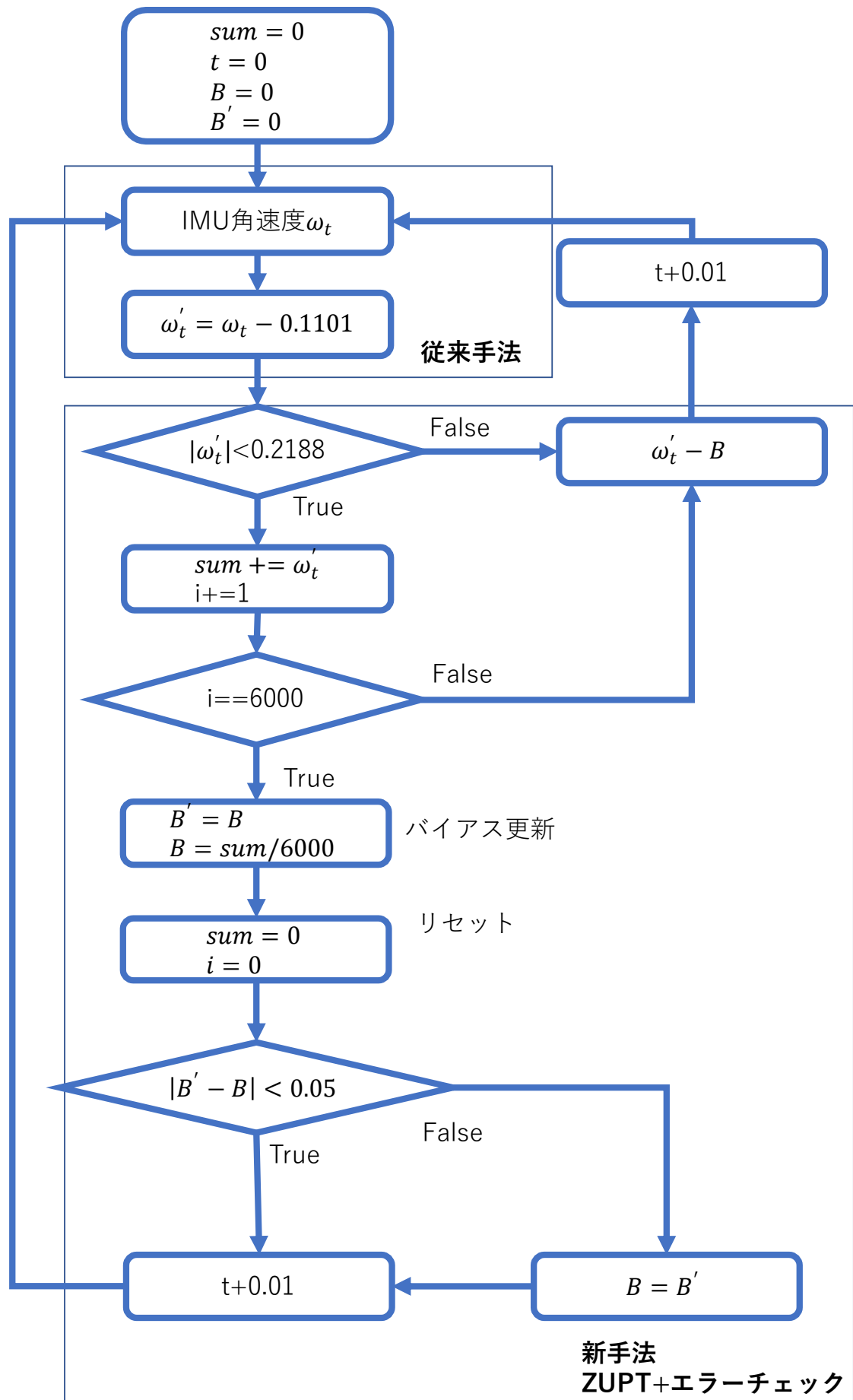


図 11 角速度 ZUPT フローチャート

初期バイアスの設定方法：

直進時の 60 秒間平均値を用いて設定を行った。角速度の 60 秒移動平均を図 12 に示す。本来は直前の値を使用するのがよいが、449800 秒から 450000 秒までの区間では旋回の影響が残っていると考えられたため、その前の直進区間である 449600 秒～449800 秒間の値の一つを使用した。

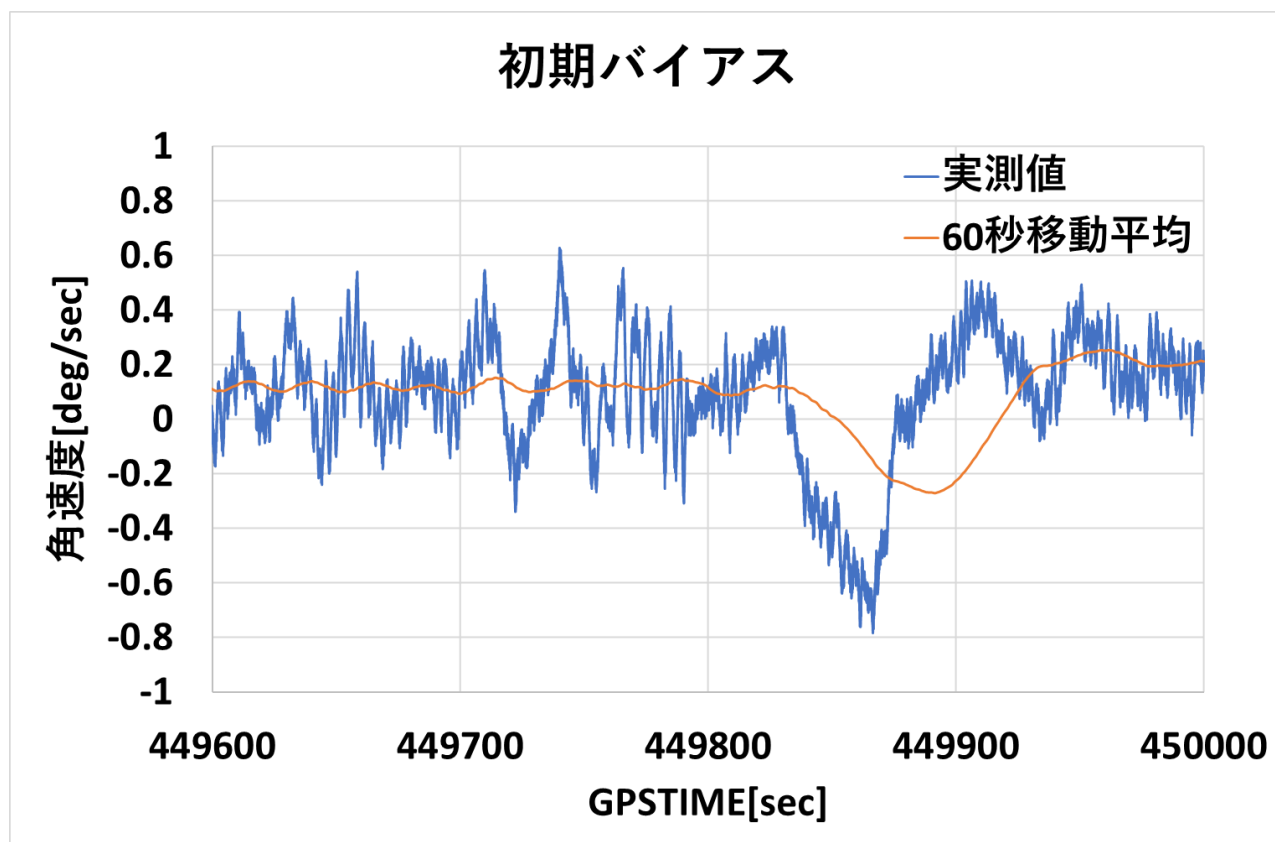


図 12 60 秒移動平均

設定した初期バイアス $0.1101[\text{deg/sec}] = 0.001922[\text{rad/sec}]$

2.3 ドップラソナー

ドップラソナーは海底からの反射波が得られる場合、送信した音波と受信した音波の間に船舶が移動することによって発生するドップラシフトを利用し、対地速度を求めることが可能である。以降、ドップラソナーによって求めた速度を Sonar 速度と呼称する。本研究では東京海洋大学の実習船”汐路丸”に搭載されている ATLAS DOLOG SYSTEM を利用して対水速度を計測した。ドップラソナー表示板は上下 3 つのディスプレイで構成されており、最上段は船首方向速度、中段は両舷方向速度、最下段は航走距離を表す(図 13)。本研究ではデジタルデータを出力することが難しかったため、表示ディスプレイをカメラで録画し、手作業でエクセル上にデータを書き写したものを使用した。今回使用したドップラソナーの測定精度等の諸元を表 2 にまとめる。ATLAS DOLOG SYSTEM は汐路丸船首スラスタ前方の船底に設置されており水深 1~600[m] の範囲で船首尾方向と横方向の対地または水深 30[m] 以上の場所で対水速度を得ることができる。なお、本実験では対地モードで測定を行った。測定精度は 0.01[knot] または測定値の 0.2[%] の大きい方となっており、本研究の実験航海中は 7.7~11.6[knot]、平均 9.1[knot] で航行したため 0.2[%] だと 0.018[knot] となり、秒速に直すと 0.009[m/sec] となる。しかし、実際の測定では必ずしもこの誤差だけではなく原因不明の測定値の飛びや測定不能な時間帯があった。これらの問題については詳細な原因はわからないが、一般的には激しい動揺によって正常に受波できなかった場合や船体下部に流入した気泡がドップラシフトの測定に影響を及ぼすといわれている。⁽⁸⁾



図 13 ドップラソナー表示板

表 2 ドップラソナー諸元

ATLAS DOLOG SYSTEM 諸元		
測定範囲	対地測定	水深1~600[m]
	耐水測定	水深≧30[m]
測定精度	-	0.01[knot]または測定値の0.2[%]の大きい方
送信周波数	-	約79[KHz]
送信電力	-	100[W]
ビーム幅	前後方向	7×9[°]
	正横方向	10×7[°]
出力	対地速度	船首尾方向と横方向の速度[knot]
	耐水速度	

$$\text{実験航海中の測定精度 平均値} \quad 9.1[\text{knot}] \times \frac{2}{1000} = 0.018[\text{knot}] \quad (1)$$

$$0.018[\text{knot}] = 0.009[\text{m/sec}] \quad (2)$$

第3章 複合航法

3.1 デッドレコニングとは

デッドレコニング(DR 又は推測航法)とは IMU によって測定した角速度や加速度といった情報を用いて現在の方位・速度を推定、その推定値を積分すること現在位置を推測する航法を指す。デッドレコニングを利用することで短時間であれば GNSS が利用できない場合でも現在位置を推定することができる。一般的にはトンネル内や高架下を通過する際に GNSS が利用不可能になった場合の繋ぎとして利用される。本研究ではこれを数秒といった短時間ではなく 1 時間以上の長期にわたって利用した場合どのくらいの累積誤差が位置に蓄積するのかについて調査を行い、その低減に努めた。

3.2 方位推定

3.2.1 IMU のみを使用した方位推定

IMU で測定した加速度や角速度には微細なバイアスが含まれることからそれらを積分していくことで速度・方位・位置を求めると時間経過で誤差が蓄積する。このバイアスは 2.2 でも示したように静止状態でも発生しており、補正しない場合は大きな誤差となる。そこで本研究では 2.2.1 にて示した初期バイアス補正と条件付き ZUPT を行うことで方位バイアスの低減を行った。初期バイアス補正と ZUPT について(3)および(4)、(5)式にまとめる。以降、この方法で求めた方位を IMU 方位と呼称する。積分を行って方位を求めるには開始時の初期方位を与える必要があるが、本実験では IMU/Sonar 測位に切り替わった 450000 秒時点での GNSS 方位 128.77[deg]を与えた。

$$\Delta t = 0.01[\text{sec}] \quad \omega_t = \text{時刻}t \text{の} Z \text{軸回り角速度}[\text{deg/sec}] \quad \theta = \text{方位角}[\text{deg}]$$

$$\text{初期バイアス補正} \quad \omega'_t = \omega_t - 0.11065[\text{deg/sec}] \quad (3)$$

$$\text{ZUPT処理} \quad \text{If}(|\omega'_t|) > 0.2188 [\text{deg/sec}] \quad B_t = \sum_{i=0}^{6000} \omega'_t \quad (4)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + (\omega_{t-1} - B_t)\Delta t \quad (5)$$

3.2.2 GNSS/IMU とカルマンフィルタを利用した方位推定

IMU のみを使用した方位推定の妥当性を評価するため、先行研究において効果が認められているカルマンフィルタ⁽⁸⁾を利用して GNSS で求めた方位を IMU の角速度と統合することで比較基準値となる方位を生成した。(6)～(13)に一般的なカルマンフィルタの式とパラメータをまとめ、それに適用した各種パラメータを記載する。カルマンフィルタの誤差共分散 R の値は以下の様な方法で決定した。GNSS の NMEA 方位は $\pm 1^\circ$ 程度の白色雑音様の誤差が含まれているため、 $\sigma_{\theta_G} = 1$ と設定した。角速度の誤差標準偏差は実験前にあらかじめ取得しておいた静止時の出力値(ノイズ)の標準偏差 $\sigma_{\omega_z} = 0.02$ を設定した。以降、この方法で推定した方位を KF 方位と呼ぶ。

$$x_k = [\theta_{G_k} \quad \omega'_k] \quad F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_G}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\theta_{G_k} \dots \text{GNSS 方位}[\text{deg}] \quad dt_G = 0.2[\text{sec}] \dots \text{GNSS 周期}$$

$\sigma_{\theta_G} = 1.0 \dots$ GNSS 方位の誤差標準偏差

$\sigma_{\omega_z} = 0.02 \dots$ IMU 角速度の誤差標準偏差

状態方程式

$$x_{k+1} = F_k x_k + G w_k \quad (7)$$

観測方程式

$$y_k = H x_k + v_k \quad (8)$$

1 ステップ前の推定値から現在の状態を修正

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (9)$$

次ステップの値を推定

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \quad (10)$$

カルマンゲインの更新

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (11)$$

誤差共分散行列の更新

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \quad (12)$$

次ステップの誤差共分散行列の推定

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T \quad (13)$$

3.3 速度推定

3.3.1 IMU による速度推定

IMU の X 方向加速度成分を積分すると、速度情報が得られる。この速度を V_{a_k} とする。しかし、IMU の出してくる加速度にはバイアスが含まれているため、このバイアスを取り除かなければならない。本研究ではシンプルの実験開始前の 60 秒間分の平均値をバイアスとして取り除いた。この値を初期バイアス、 b_{ax_0} と呼称する。本来であれば ZUPT 等によって随時バイアス推定値を修正しなければならないが動揺や潮流の影響が激しく、船舶の加減速によって必ずしも周期的な値が取れるとは限らない加速度を ZUPT にかけることは難しい。よって本研究では加減速がない直進中の値で平均値を取った初期バイアスのみを利用することとした。

$$\Delta t = 0.01 [\text{sec}]$$

$$b_{ax_0} = \sum_{i=0}^{6000} a_t \quad (14)$$

$$V_{a_{k+1}} = V_{a_k} + (a_{x_k} - b_{ax_0}) \Delta t \quad (15)$$

3.3.2 ドップラソナーによる速度推定

本研究で用いたドップラソナーは X 方向と Y 方向の速度成分を別々に表示しているが、位置計算に用いるため XY 成分を(16)式で合成して水平速度とする。

$$V_{x_k} \dots X \text{ 方向のSonar表示速度 [m/sec]} \quad V_{y_k} \dots Y \text{ 方向のSonar表示速度[m/sec]}$$

$$V_k = \text{水平速度[m/sec]} \quad \Delta k = 1[\text{sec}]$$

$$V_k = \sqrt{V_{x_k}^2 + V_{y_k}^2} \quad (16)$$

3.3.3 カルマンフィルタによる速度のスムージング

ドップラソナーで求めた値をカルマンフィルタと加速度を使ってスムージングすることで精度向上を目指した。カルマンフィルタの各パラメータを(17)および(18)に、一般式を(19)～(25)に示す。この方法でスムージングした速度を Sonar/IMU 速度と呼称する。ドップラソナーの誤差標準偏差は実験前の加減速を行っていない区間で標準偏差を取って設定した。

$$x_k = [V_{x_k} \quad V_{y_k} \quad a_{x_k} \quad a_{y_k}] \quad (17)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_{V_x}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{V_y}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{a_x}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_y}^2 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Delta t_s = 1[\text{sec}] \dots \text{ドップラソナー観測周期}$$

$$\sigma_{V_x} = 0.11 \dots \text{Sonar 表示速度(X方向)の誤差標準偏差}$$

$$\sigma_{V_y} = 0.11 \dots \text{Sonar 表示速度(Y方向)の誤差標準偏差}$$

$$\sigma_{a_x} = 0.06 \dots \text{IMU 加速度(X方向)の誤差標準偏差}$$

$$\sigma_{a_y} = 0.06 \dots \text{IMU 加速度(Y方向)の誤差標準偏差}$$

状態方程式

$$x_{k+1} = F_k x_k + G w_k \quad (19)$$

観測方程式

$$y_k = H x_k + v_k \quad (20)$$

1 ステップ前の推定値から現在の状態を修正

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (21)$$

次ステップの値を推定

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \quad (22)$$

カルマンゲインの更新

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (23)$$

誤差共分散行列の更新

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \quad (24)$$

次ステップの誤差共分散行列の推定

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T \quad (25)$$

3.4 位置推定

本研究ではこれまでに紹介した速度/方位の推定方法を3つの組み合わせで試し、位置精度にどのように影響するのか調査した。図15~図17に各組合せのフローチャートを示す。なお、加速度のバイアス除去は初期バイアス除去のみ、角速度のバイアス除去は2.2.1で示した方法で行う。なお、現在位置の推定には(26)および(27)式を用いる。

px, py = 基準局を0とした場合のXY座標[m]

V_t = 速度[m/s] $\Delta t = 1$ (速度の更新間隔)

$$px_t = px_{t-\Delta t} + V_t \cdot \sin(\theta_t) \cdot \Delta t \quad (26)$$

$$py_t = py_{t-\Delta t} + V_t \cdot \cos(\theta_t) \cdot \Delta t \quad (27)$$

まず、組み合わせ1ではIMUのみを利用して速度・方位を推定した。この場合IMUの特性上バイアスによって大きな誤差を受けることが想定される。特に加速度は移動中のZUPTが難しいことから初期バイアス補正のみ行っているため、速度の推定精度が低いことが問題となると考えられる。次に、組み合わせ2では3.3.2の方法で求めたドップラソナー速度とIMUで求めた方位を利用して現在位置を推定した。組み合わせ1に比べて加速度のバイアスを受けない分、測位精度は向上することが予想される。ただし、ドップラソナーで観測した速度には稀に原因不明の飛び値が含まれるため、その影響を受けることが予想される。最後の組み合わせ3ではドップラソナーとIMUの加速度情報をカルマンフィルタで統合することでドップラソナーの観測した速度に含まれる飛び値を取り除くことで精度向上を目指した。

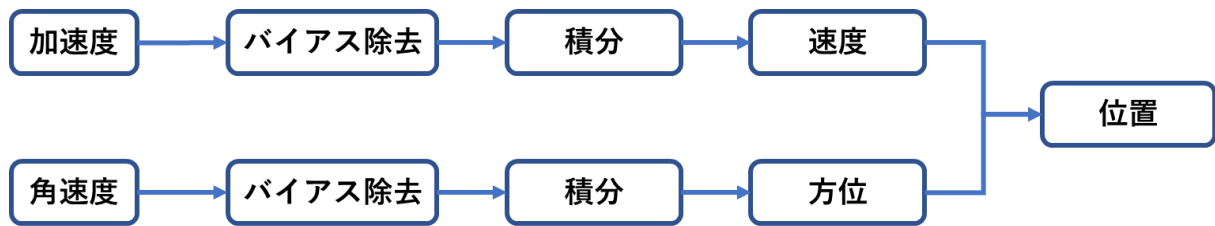


図 14 IMU 速度+IMU 方位（組み合わせ 1）

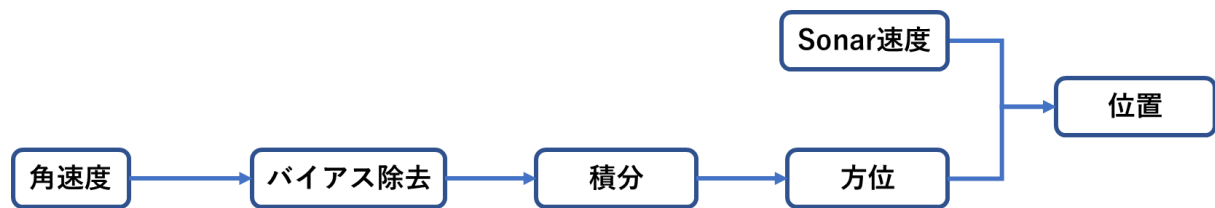


図 15 SONAR 速度+IMU 方位（組み合わせ 2）

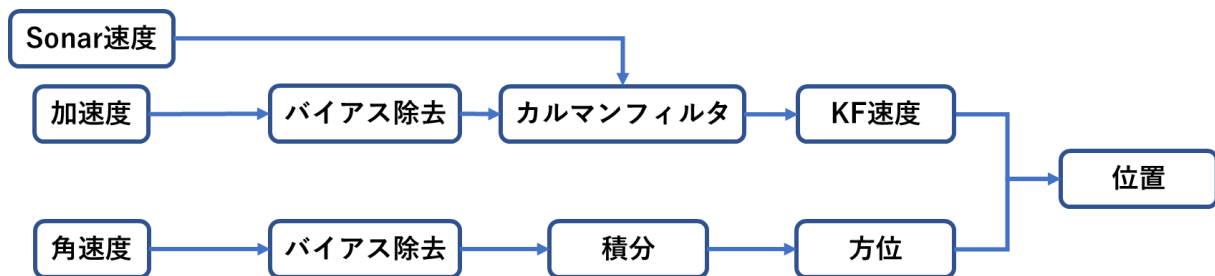


図 16 SONAR/IMU 速度+IMU 方位（組み合わせ 3）

第 4 章 実験

4.1 実験概要

本実験では東京湾内を航海中、羽田空港付近で GNSS 受信機のジャミング検出機能または IMU/ドップラソナー複合航法との比較により妨害を受けたことを検出したと仮定し、妨害直前の GNSS 方位を IMU 方位の初期方位として与えた。そして、IMU 方位とソナー速度、またはソナー速度と IMU の加速度情報をカルマンフィルタで統合して得た速度を利用して測位を行った場合、GNSS 由来の速度・方位情報を利用した場合と比較してどの程度の測位精度を達成できるのかについて比較した。データは東京海洋大学の練習船汐路丸の研究室内に IMU、GNSS 受信機を設置し取得した。また、船橋のドップラソナー表示をカメラで撮影した。本実験の概要を表 3 にまとめる。また、本実験で利用したセンサのサンプリング周波数を表 4 にまとめる。これらのセンサの統合には複数のカルマンフィルタ(以後、都合上 KF と記載する箇所もある)を利用したため結果とあわせて紹介する。推定した方位・速度・位置を比較する比較値には海洋大基準局 Trimble NetR9 と汐路丸に設置した Trimble SPS855 受信機間で RTK 測位を行った結果を利用した。本実験の設置作業の様子を図 17 と図 18 に、実験航海の航跡プロットを図 19 に示す。航跡プロットは先述した海洋大基準点座標を 0 として経度方向を X 軸、緯度方向を Y 軸にとった航跡のプロットで、羽田空港付近でジャミング・スプーフィングを受けたと仮定して Sonar/IMU 測位を行った区間(以下、実験区間)を赤線で、実験外の通常航海区間を青点線で示したものである。この実験区間を平均 9.1[knot]で 1 時間航行したデータを自作した Sonar/IMU 推測航法プログラムに入力して推測航法を行った。



図 17 汐路丸研究室での設置作業の様子



図 18 ドップラソナー録画用の三脚設置状況

表 3 実験概要

実験概要		
日時	2019/10/4	
実験場所	東京湾羽田空港付近	
使用船舶	汐路丸	
センサ	GNSS	Trimble SPS855 (RTK)
	IMU	東京航空計器 CSM-MG100
	Sonar	汐路丸に設置されたドップラソナー
GNSS基準局	設置場所	東京海洋大学第4実験棟屋上
	受信機	Trimble NetR9

表 4 データ取得周期一覧

取得データ一覧					
	角速度	加速度	方位	速度	位置 (RTK)
IMU	100Hz	100Hz	\	\	\
GNSS	\	\	5Hz	5Hz	5Hz
Sonar	\	\	\	1Hz	\

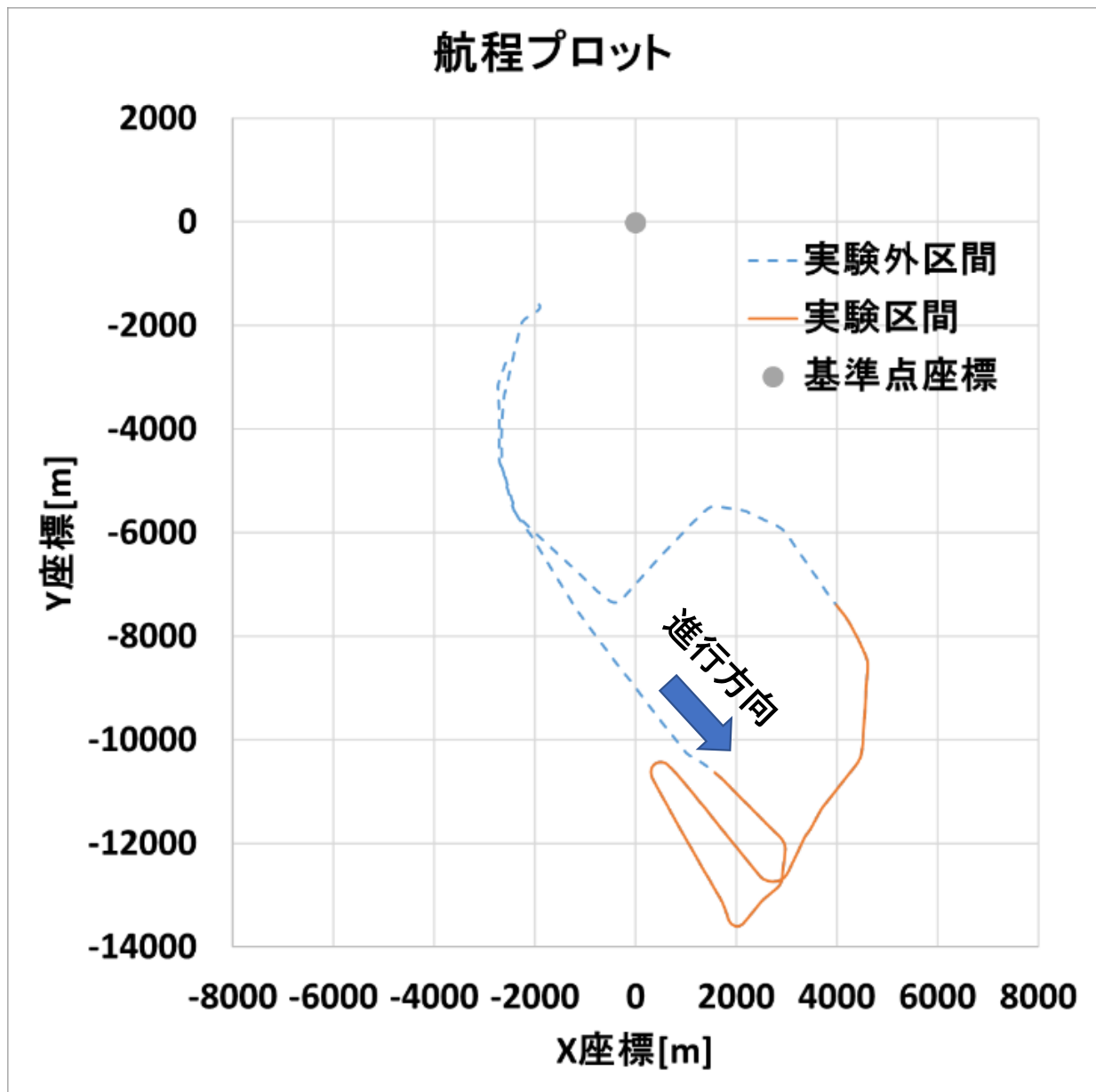


図 19 航程プロット

4.2 実験結果

4.2.1 方位推定結果

まず、補正前の角速度と初期バイアス+ZUPT による補正を行った角速度を図 20 に示す。黄色が補正前の角速度、青色が補正後の角速度であり、橙色と灰色の線は ZUPT に含める値の上端と下端の閾値を表している。この図から補正前の角速度が ZUPT の閾値よりも上に飛び出していることがわかる。本研究で提案する新手法では角速度の絶対値が $0.2188[\text{deg/sec}]$ 以下の時に ZUPT を行うため、最低でも初期バイアス補正を行ってオフセットした後でなければ補正前の角速度がはみ出している箇所を取りこぼしてしまい、バイアス推定が正常に働かない。そのため、正確な初期バイアス補正を行うことが重要となる。次に補正後の角速度を使って求めた IMU 方位と KF 方位の方位差分と全体の方位変化プロットを図 21 に示す。方位差の最大値は 4.3 度、誤差の標準偏差は 1.7 度となった。特に注目すべき点は IMU 方位と KF 方位の差が大きくでた後に反対方向に同じ誤差がでて元の方位誤差に戻る点がおおむね変針点と重なることである。この理由は船体軸に対して固定された IMU が検出した角速度の積分によって方位を求めると船首方位となり、進行方位を表している GNSS/IMU カルマンフィルタで推定した KF 方位との間で旋回時の横滑り(スリップ)の分誤差が発生するためである。その結果、変針時の最大誤差は大きいがスリップであれば旋回終了と同時に誤差は減少する。スリップ以外の箇所の誤差は概ね ZUPT によって取り除くことができている。ただし 453000 秒付近の様に緩やかに小さな変針を行った場合 ZUPT に用いる値に旋回中の角速度が含まれてしまい、その結果としてその分の誤差がバイアスとして方位推定結果にも表れていると考えられる。この事から、直進しているかどうかの判定精度を向上させることができれば更に方位推定精度を向上することができると考えられる。

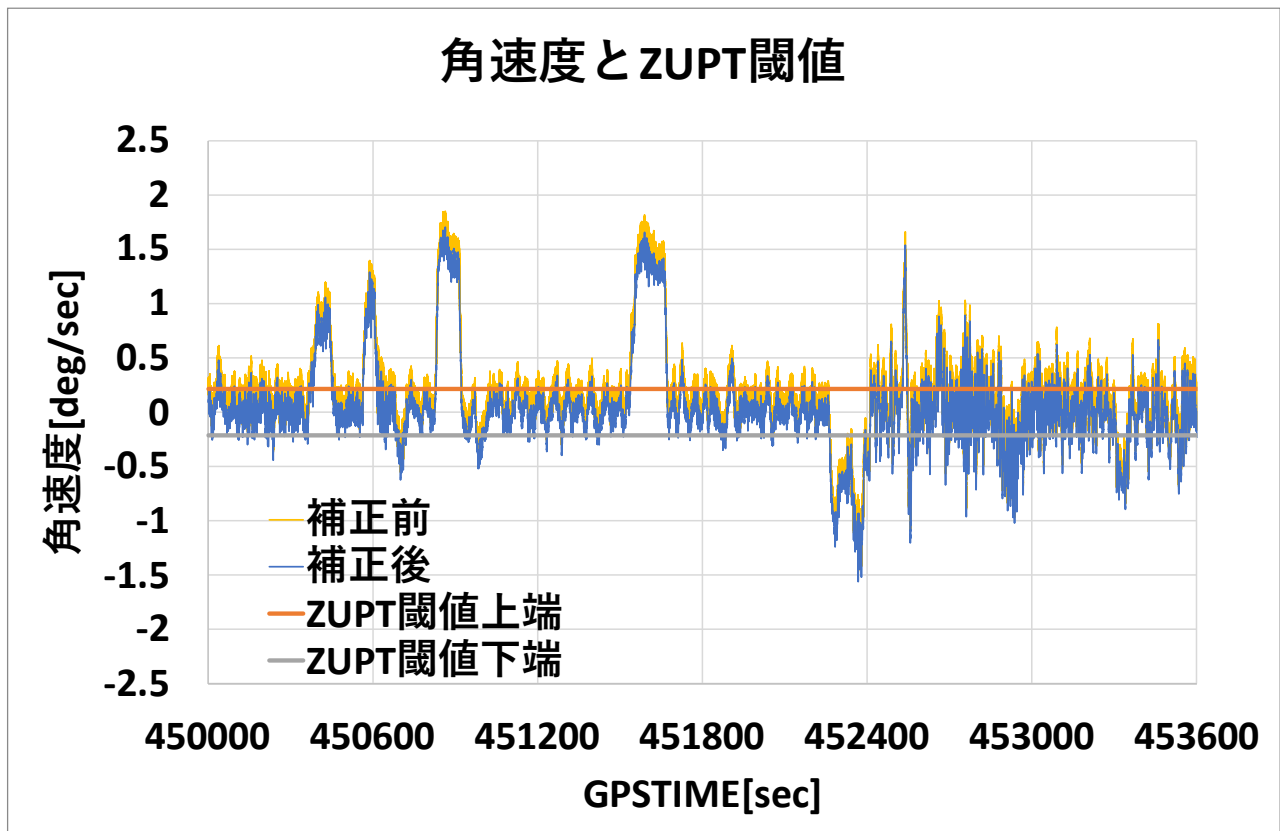


図 20 角速度の補正

初期方位:128.77[deg] (直前の GNSS 方位より取得)

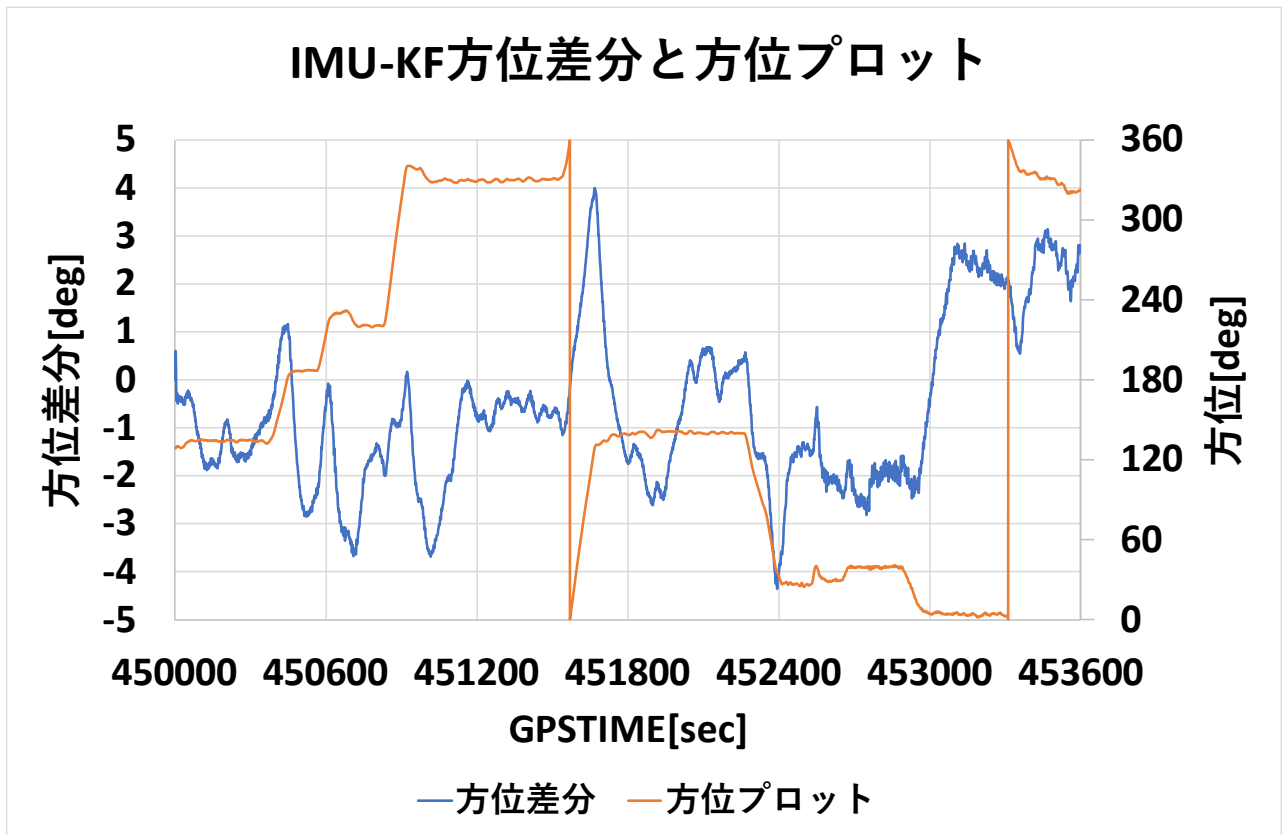


図 21 IMU-GNSS 方位差分と方位変化プロット

4.2.2 速度推定結果

まず、加速度の積分によって求めた IMU 速度と GNSS 速度を比較すると図 22 の様になる。IMU 速度は明らかにバイアスの影響を受けており、初期バイアス補正だけでは誤差の補正が不十分であることがわかる。しかし、常に動揺が発生しているうえに加減速まで行う移動体での加速度への ZUPT 適用は難しい。そこで、ドップラソナーをベースとした速度を利用することで速度性能の向上を図る。Sonar 速度と Sonar/IMU 速度の比較を行った結果を図 23 に示す。カルマンフィルタによってドップラソナー速度がスムージングされることで突発的な飛びを解消できたため、飛びによる位置推定への影響を排除することができた。最後に GNSS 速度とドップラソナー速度・カルマンフィルタ速度の差分を取ると図 24 の様になる。誤差標準偏差はドップラソナー速度が 0.09[m/s]カルマンフィルタ速度が 0.08[m/s]、誤差平均はドップラソナー速度が 0.003[m/s]カルマンフィルタ速度が 0.0008[m/s]となり、カルマンフィルタを適用することで若干の精度向上が認められた。

IMU速度とGNSS速度比較

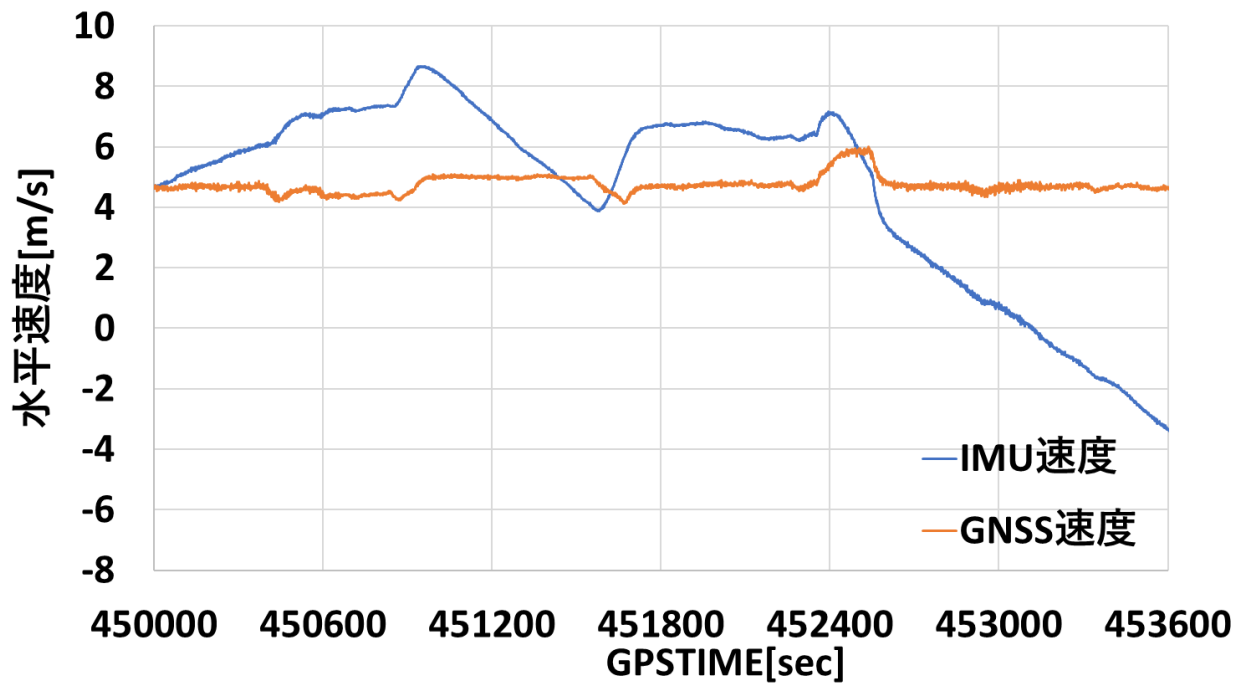


図 22 IMU 速度と GNSS 速度比較

ドップラソナーとカルマンフィルタ速度比較

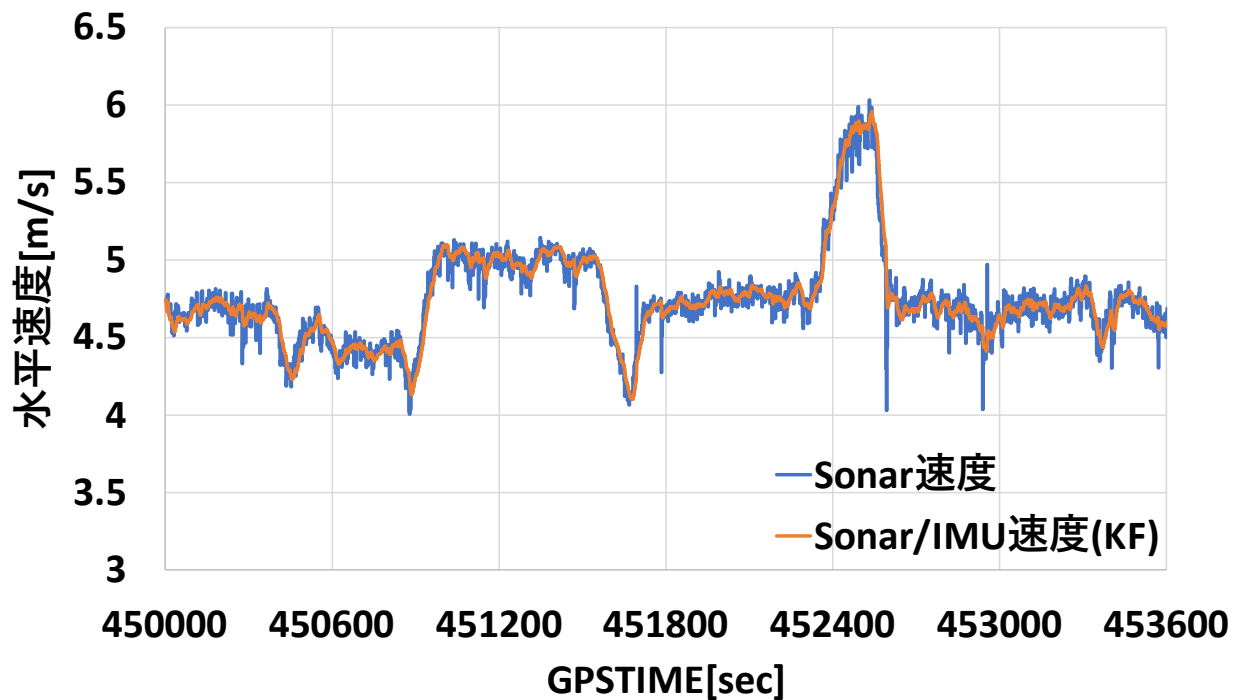


図 23 ドップラソナーとカルマンフィルタ速度比較

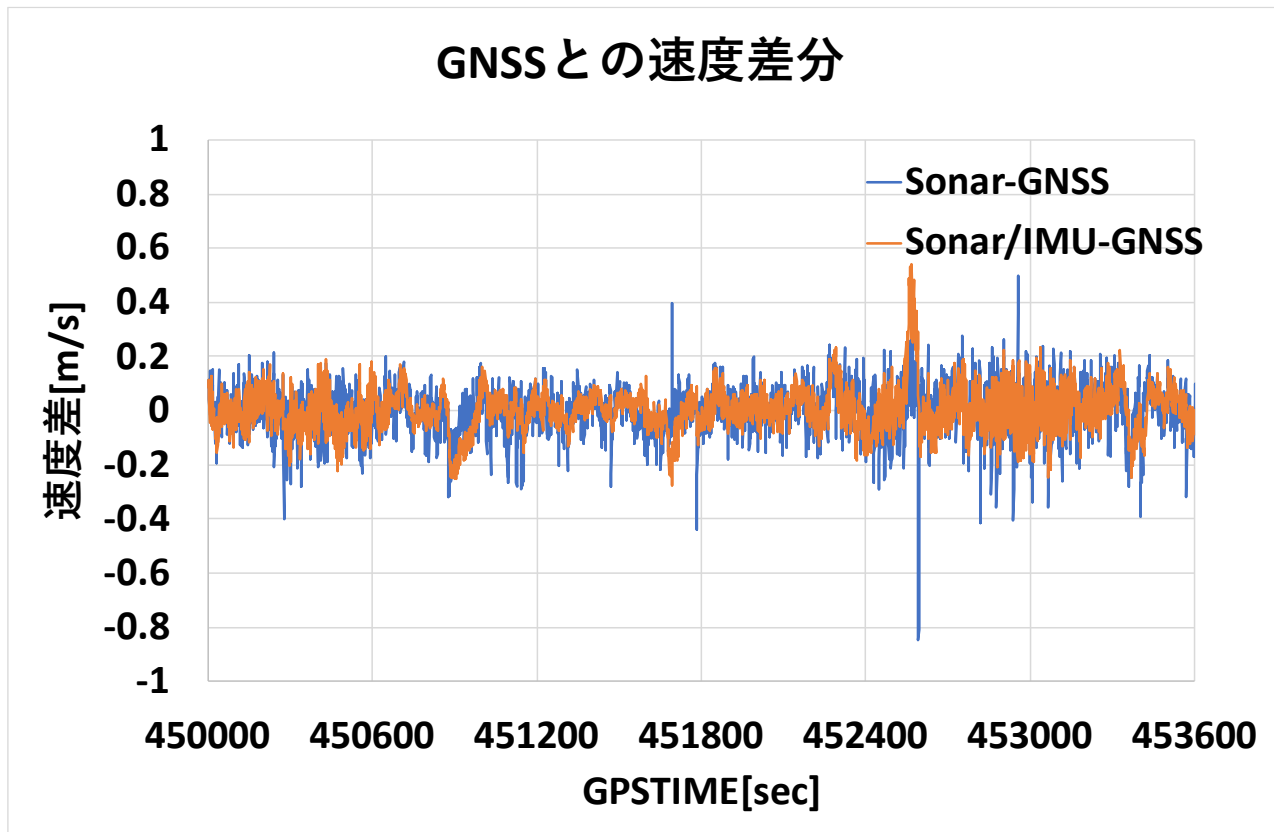


図 24 速度差比較

4. 2. 3 位置推定結果

これまで求めてきた各速度と IMU 方位を組み合わせでデッドレコニング(位置推定)を行ったところ、1 時間での水平誤差は図 25 の様になった。IMU 速度を利用する場合は 1 時間で 5000[m]を超える誤差が発生している。このままでは組み合わせ 2 と組み合わせ 3 の結果が比較しづらいため拡大すると図 26 の様になる。また、組み合わせ 2 と 3 の水平誤差を X 方向、Y 方向それぞれに分割した累積誤差プロットを図 27, 図 28 に示す。この結果、ドップラソナー速度を用いて推測航法を行った場合の累積誤差は 82.5[m]、Sonar/IMU 速度を利用した場合の累積誤差は 86.5[m]となった。本研究で目標とした 100[m]という精度は補正ありなしに関わらず達成できたが、この結果だけを見るとカルマンフィルタで補正した速度を利用した場合精度が低下している様に感じられる。しかし、Sonar/IMU 速度の誤差標準偏差自体は減少していることから、これはドップラソナー速度に含まれる飛び値が積分する際に結果的に位置精度が向上するように寄与しただけで、逆方向への飛びが発生していれば位置精度が低下すると考えられる。そこで、比較評価の対象として計算した GNSS/IMU カルマンフィルタで推定した KF 方位とこれまでに計算した各速度を用いて位置推定を行った場合どのような結果になるのか追加の検証を行った。

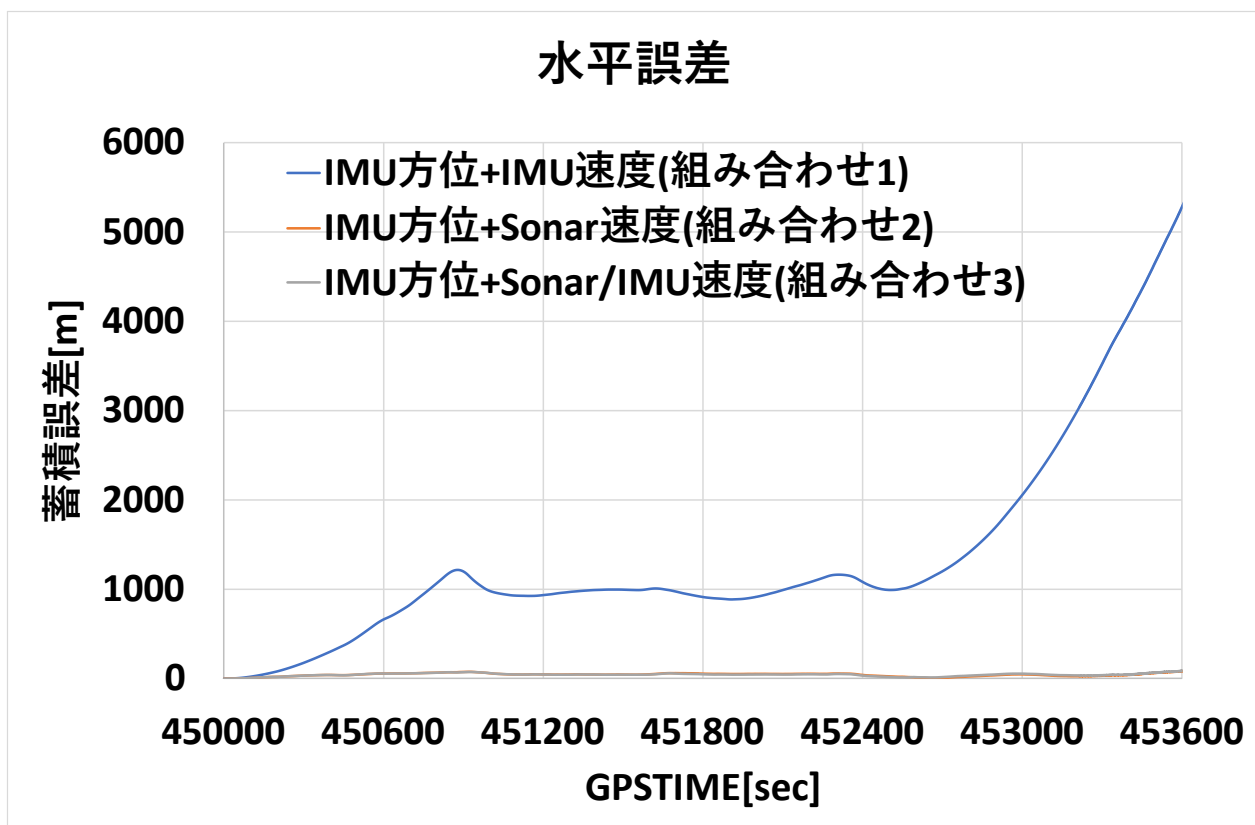


図 25 水平誤差

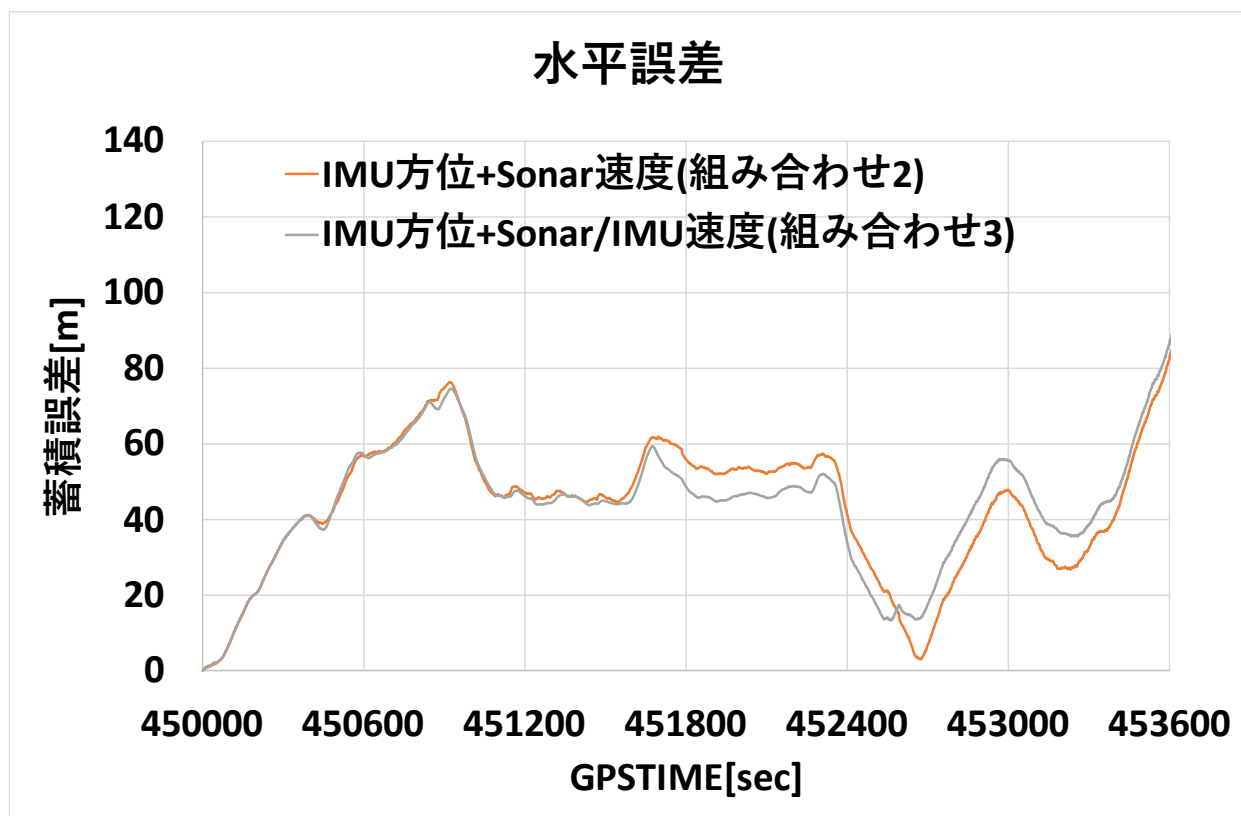


図 26 水平誤差 拡大図

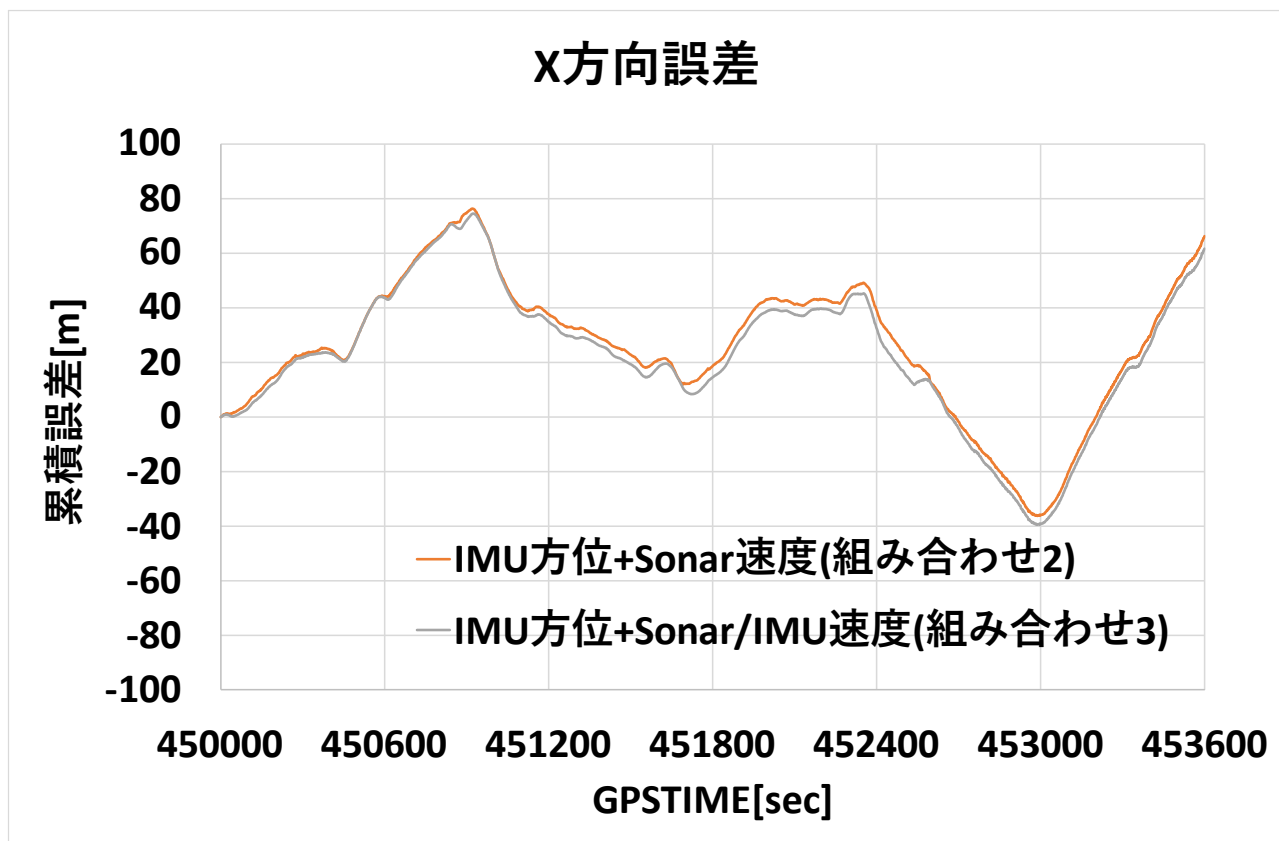


図 27 X 方向誤差

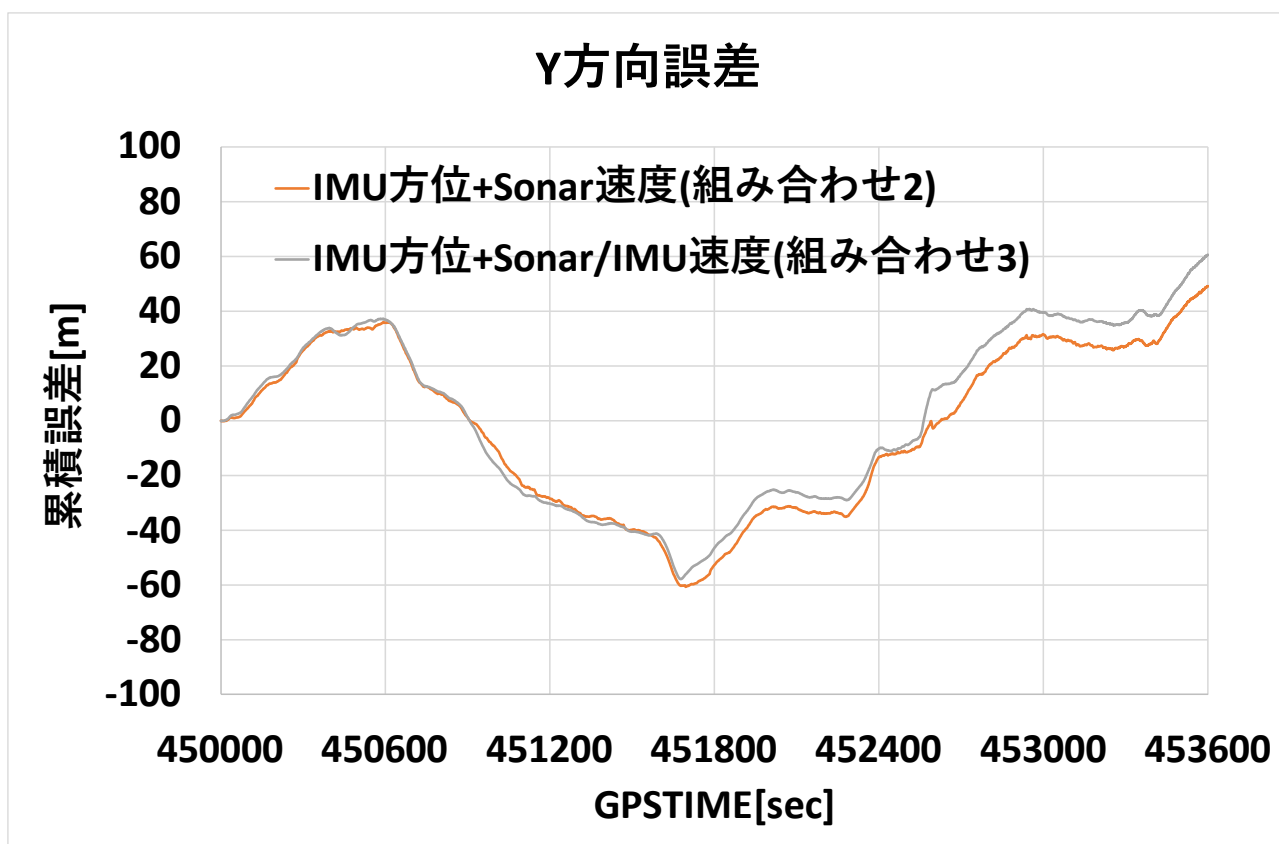


図 28 Y 方向誤差

4. 2. 4 GNSS/IMU カルマンフィルタ方位を利用した場合の位置推定結果

IMU 方位を利用した位置推定ではドップラソナー速度をカルマンフィルタで補正しないほうが誤差は小さい結果となっていた。この理由はドップラソナーの飛び値と方位誤差が噛み合って推定位置結果が良くなる方向に誤差が発生したためではないかと考え、より正確な方位である GNSS/IMU カルマンフィルタで推定した KF 方位を利用して同様の位置推定を行った。IMU 方位を利用した組み合わせ 1～3 と同様に KF 方位と各速度の新しい組み合わせを組み合わせ 4～6 とする。組み合わせ 4(図 29)では GNSS 速度と KF 方位を利用し、組み合わせ 5(図 30)ではドップラソナー速度と KF 方位を利用し、組み合わせ 6(図 31)ドップラソナー速度をカルマンフィルタで補正した速度と KF 方位を利用した。この方法での推測航法を実施した結果を図 32 に示す。この結果、IMU 方位を利用した場合とは逆に最大誤差はカルマンフィルタによる速度補正を行った場合のほうがよくなった。全体的に見ると補正した場合のほうが誤差蓄積は少ないが、補正しないほうが誤差蓄積が少なくなる場所もある。これは積分によって位置推定を行う場合、速度の小さな飛びが位置推定に影響を与えていることを示している。ただし、誤差蓄積の全体的な傾向は GNSS 速度を利用した場合とドップラソナー速度を使用した場合で似通っていることから全体的な速度性能は良好であると考えられる。水平誤差を X 方向、Y 方向に分割したものを図 33 と図 34 に示す。

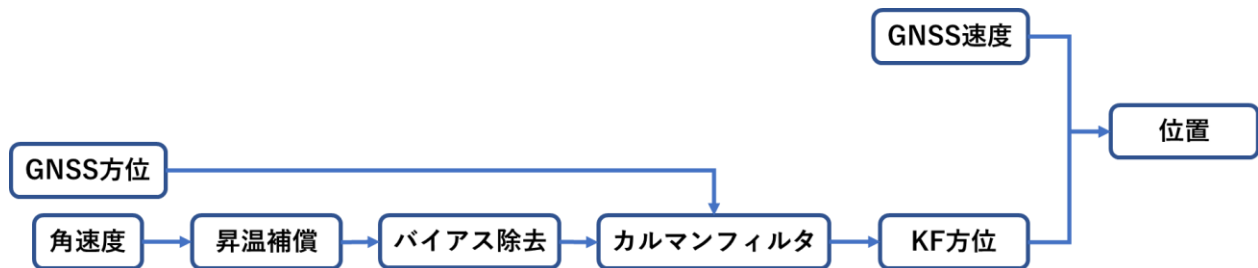


図 29 GNSS 速度+KF 方位(組み合わせ 4)

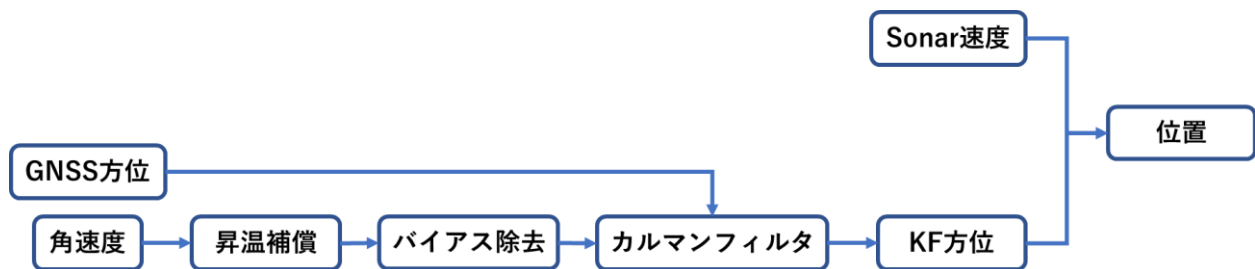


図 30 SONAR 速度+KF 方位(組み合わせ 5)

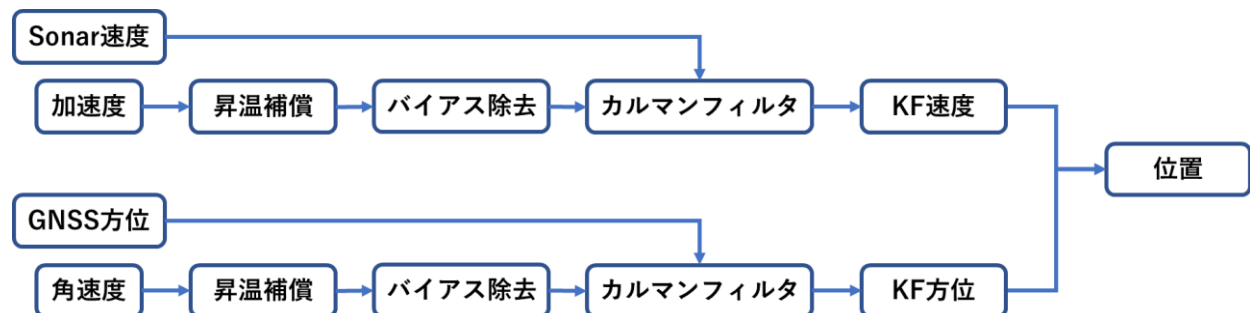


図 31 SONAR/IMU 速度+KF 方位(組み合わせ 6)

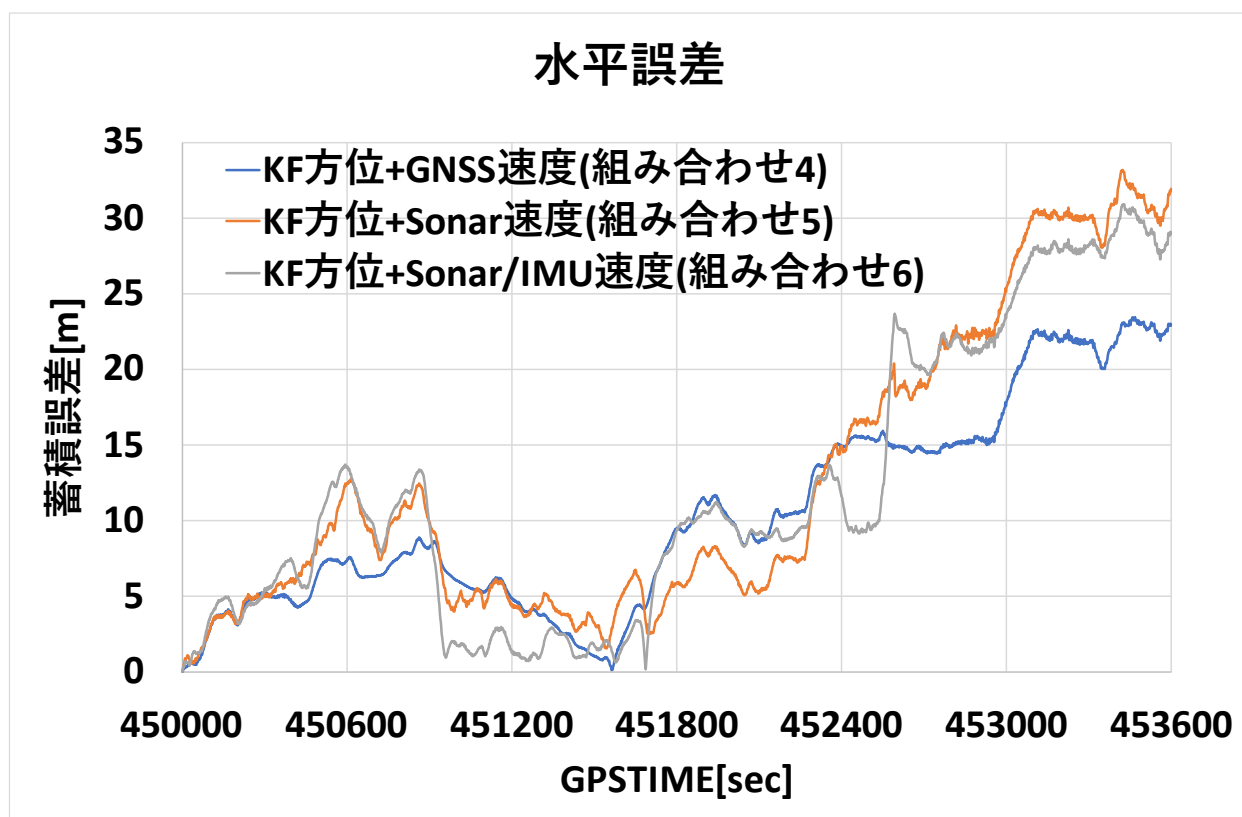


図 32 KF 方位を利用した場合の水平誤差

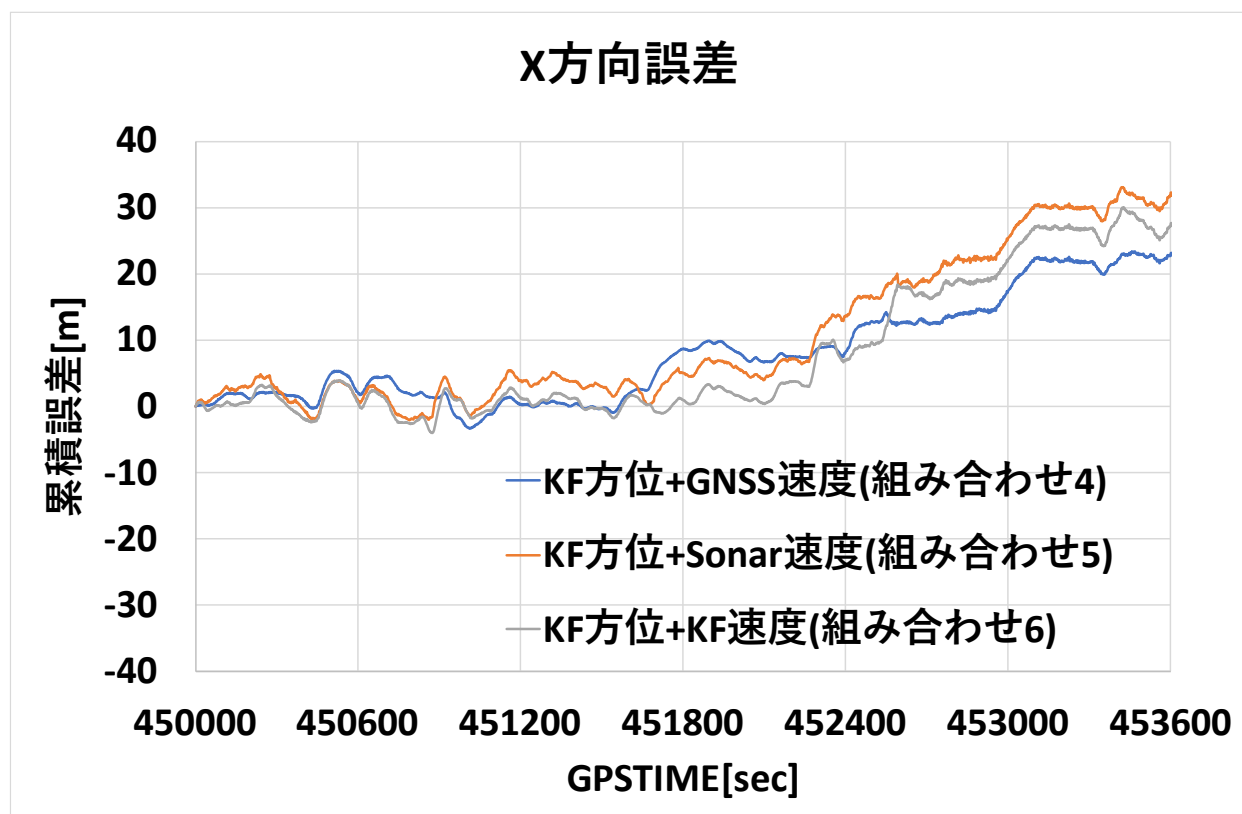


図 33 X 方向誤差

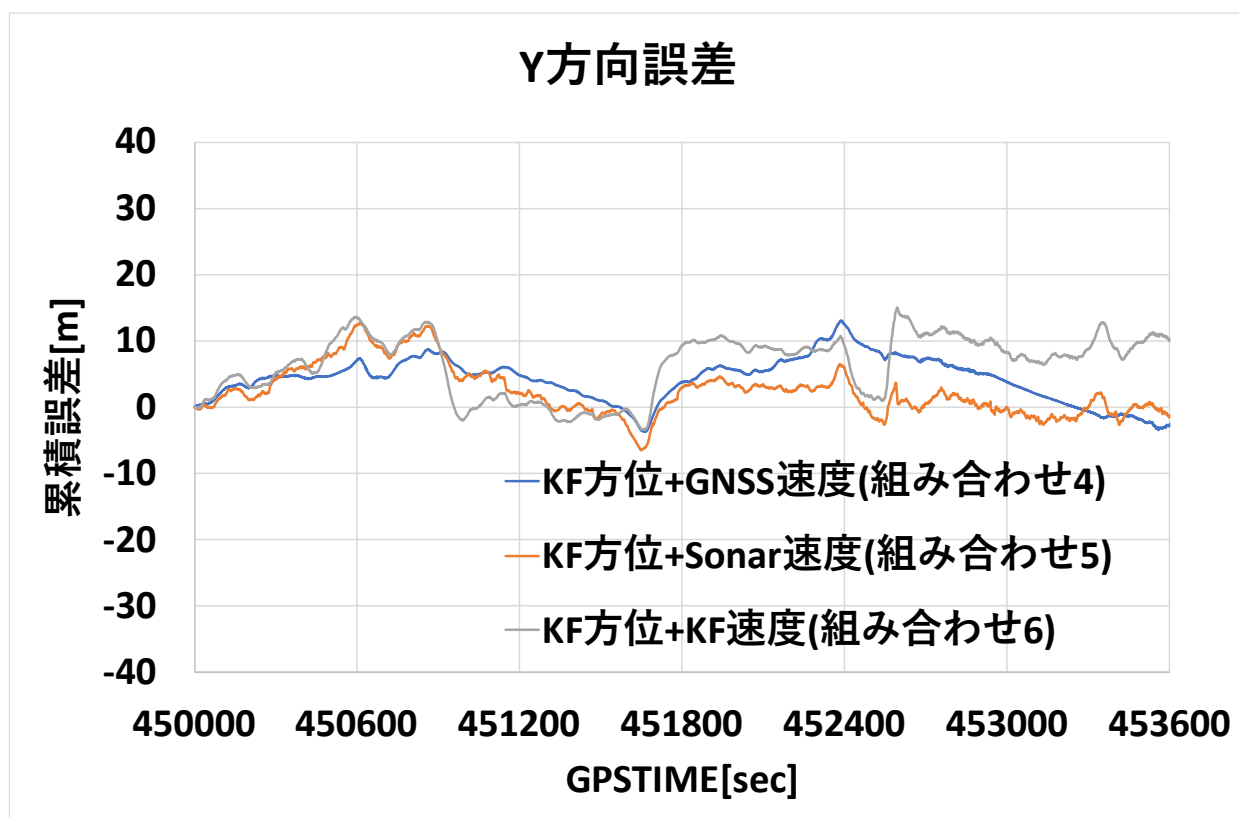


図 34 Y 方向誤差

4. 2. 4 ZUPT とエラーチェックの効果検証

組み合わせ 3 で角速度のバイアス除去の過程で従来手法である初期バイアス除去のみを行った場合と ZUPT を行った場合と ZUPT+エラーチェックを行った場合の 3 つを行った場合の評価を行う。図 35 に従来手法との累積誤差の比較を示す。青が新手法、赤が新手法からエラーチェックを取り除いた場合、灰が従来手法の結果となる。最初の 25 分間は初期バイアス除去のみを行った場合が最も良い精度を示しているが、これは初期バイアスの推定が比較的上手くいていたことを示している。バイアスは緩やかに変化していくためオフセットしてからしばらくの間は大きな誤差は発生せず、累積誤差も増大しない。しかし、ZUPT を行わなかった場合 1600 秒を過ぎたあたりでバイアスが増加したことで急激に累積誤差が増加する。一方で ZUPT のみを行った場合、最初の 1900 秒間は初期バイアスのみの場合よりも累積誤差が大きくなっている。これはバイアス推定値を ZUPT で修正した結果、逆に変針時の角速度が一部含まれた ZUPT を行うせいで精度が低下してしまっていると考えられる。そして ZUPT にエラーチェックを加えることで極端なバイアス推定値の変化を検知した場合は新しいバイアス推定値を弾くようにしたところ累積誤差の低減が確認できた。図 36 に従来手法と新手法で求めた方位と KF 方位の差分を示す。初期バイアス補正では徐々にバイアスが蓄積していくため右肩上がりとなっている。一方で ZUPT を行った場合、前半は旋回によって発生した ZUPT の異常値が影響することで初期バイアス補正のみに劣るものの、中盤のバイアス蓄積を抑えることができる。これにエラーチェックを加えると ZUPT の異常値を弾くことで方位推定精度を向上させることができる。

従来手法との比較

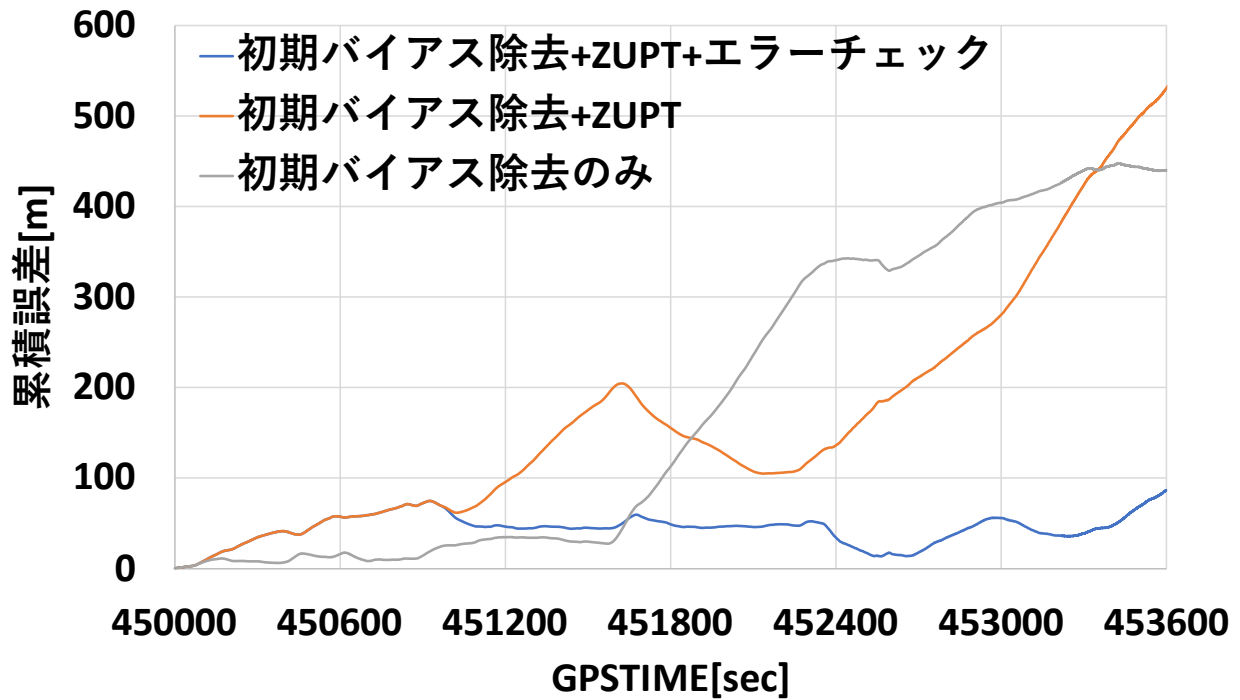


図 35 従来手法との比較

IMU-KF方位差分

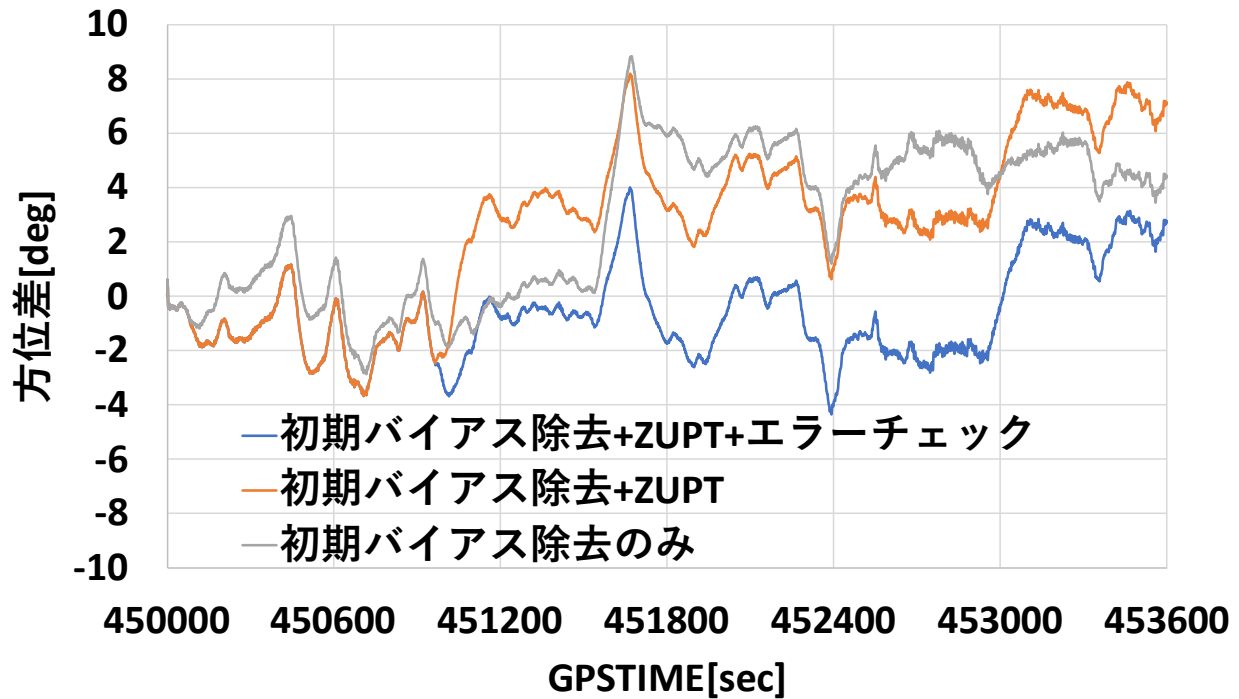


図 36 従来手法との比較(方位)

4.2.5 初期バイアス推定値を増減させた場合の累積誤差

本手法では最初に 60 秒間の平均値で推定した初期バイアス推定値によって大きく結果が変わってしまうことが課題となっている。そこで、初期バイアスを手動で増減させた場合の 1 時間累積誤差を図 37 に示す。なお、表記の簡単のために図は rad で示すが deg で表した値を表 5 に併記する。この結果、本実験で設定した初期バイアス $0.001922[\text{rad/sec}]$ は比較的良好なバイアス設定値だが、最適値は $0.000005[\text{rad/sec}]$ 増した $0.001927[\text{rad/sec}]$ を利用した場合だった。更に最適値から $0.000005[\text{rad/sec}]$ 増した $0.001932[\text{rad/sec}]$ の場合は $0.001922[\text{rad/sec}]$ の時とほぼ同じ結果となったことを考慮すると最適値から $\pm 0.000005[\text{rad/sec}]$ の範囲であれば 1 時間の累積誤差 $100[\text{m}]$ 以内を達成することができたと考えられる。

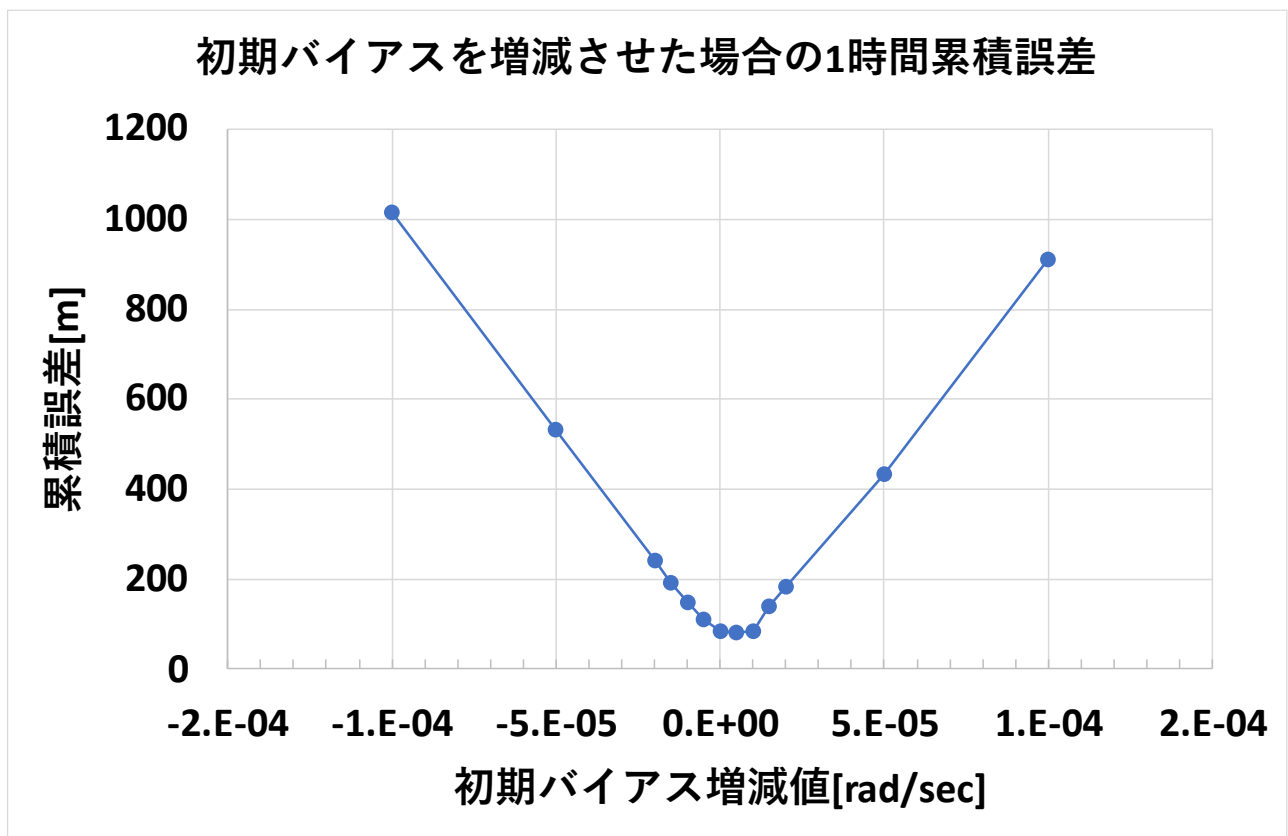


図 37 初期バイアスを増減させた場合の累積誤差変化

表 5 初期バイアスの増減値と累積誤差

初期バイアス[rad/sec]	0.001822	0.001872	0.001902	0.001907	0.001912	0.001917	0.001922	0.001927	0.001932	0.001937	0.001942	0.001972	0.002022
増減値[rad/sec]	-1.0.E-04	-5.0.E-05	-2.0.E-05	-1.5.E-05	-1.0.E-05	-5.0.E-06	0	5.0.E-06	1.0.E-05	1.5.E-05	2.0.E-05	5.0.E-05	1.0.E-04
初期バイアス[deg/sec]	0.1044	0.1073	0.1090	0.1093	0.1095	0.1098	0.1101	0.1104	0.1107	0.1110	0.1113	0.1130	0.1159
増減値[deg/sec]	-0.0057	-0.0029	-0.0011	-0.0009	-0.0006	-0.0003	0.0000	0.0003	0.0006	0.0009	0.0011	0.0029	0.0057
累積誤差[m]	1014.56	531.49	240.25	192.12	148.07	109.05	82.50	79.96	82.50	139.92	183.82	434.45	911.67

4.2.6 初期バイアスと ZUPT エラーチェックの閾値の関係

4.2.5 の結果から本手法では初期バイアス推定値が最適値から離れるほど位置の累積誤差が大きくなることがわかった。通常、静止して行う ZUPT であれば初期バイアスが最適値から離れていたとしても、ZUPT によってバイアスの補正が行われるためこの様に累積誤差が増大することはない。しかし、本手法では ZUPT のエラーチェックで $0.05[\text{deg/sec}] = 0.000873[\text{rad/sec}]$ 以上の修正を行うことを拒否するように設定しているため、ZUPT による補正が働いていないと考えられる。そこで、4.2.5 で $900[\text{m}]$ 以上の累積誤差が発生した初期バイアスを使用した際に、エラーチェックに用いる閾値を大きくすることでどのように結果が変化するかについても検証を行った。その結果を図 37 に示す。

条件

- 1, 初期バイアスが良好 ($0.001922[\text{rad/sec}] = 0.1101[\text{deg/sec}]$)
エラーチェック閾値 $= 0.000873[\text{rad/sec}] = 0.05[\text{deg/sec}]$
- 2, 初期バイアスが $0.001[\text{rad/sec}]$ ずれている場合 ($0.002022[\text{rad/sec}] = 0.1159[\text{deg/sec}]$)
エラーチェック閾値 $= 0.000873[\text{rad/sec}] = 0.05[\text{deg/sec}]$
- 3, 初期バイアスは条件 2 と同じ値を設定 ($0.002022[\text{rad/sec}] = 0.1159[\text{deg/sec}]$)
エラーチェック閾値を $0.001745[\text{rad/sec}] = 0.1[\text{deg/sec}]$ に変更した場合

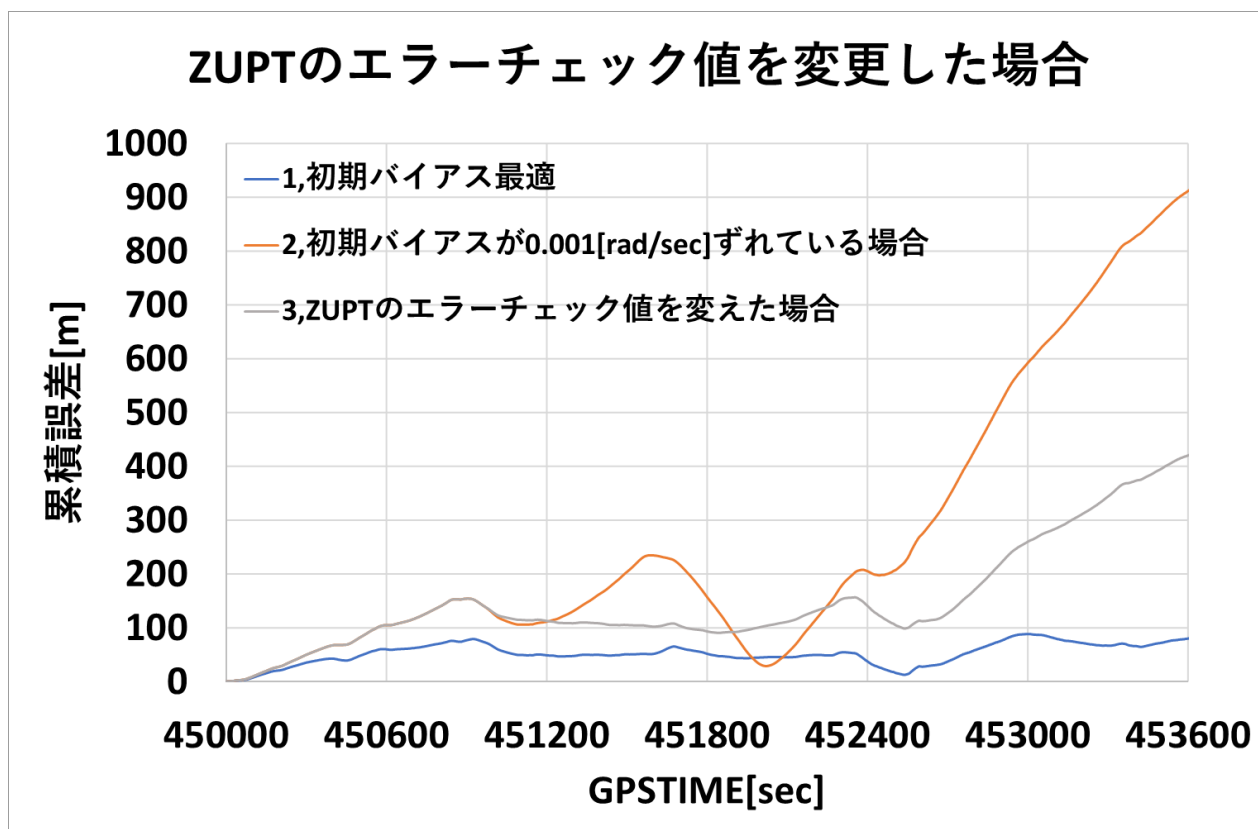


図 38 ZUPT のエラーチェック値を変更した場合

この結果、ZUPT のエラーチェック閾値を大きくすれば、初期バイアスが大きくずれていても ZUPT によってその影響を抑えることができるが、旋回中等の角速度が ZUPT に含まれた場合のエラーチェックが甘くなってしまうため最終的な誤差は初期バイアスが最適だった場合に比べて大きくなってしまったことがわかった。このことから初期バイアスを正しい値に設定することが重要である

と考えられる。また、ZUPTのエラーチェック閾値についてもバイアスの推定状況に応じて変化させる等の工夫によって結果を改善することができる可能性がある。

4.3 まとめ

ドップラソナーを利用することで GNSS による補助なしでも長期的に速度を正確に推定することが可能になった。ドップラソナーでの速度推定には飛び値が含まれるという問題点はあるものの、IMU の加速度情報とカルマンフィルタを利用してスムージングすることで飛びを取り除くことが可能である。また、GNSS の補助を得られない IMU 単体での方位推定の精度向上を目的として ZUPT を船上でも行えるようにいくつかの条件付けとエラーチェックを行った。これによって限定的ではあるが 1 時間の最大誤差を 4.3 度に抑えることができた。これらの手法で速度・方位推定精度を向上させることでドップラソナーと IMU を用いた位置推定の累積誤差を 1 時間で 80~90[m]に抑えることに成功した。この結果は GNSS と同等とまでは言えないが、目標の 1 時間で累積誤差 100[m]以内という基準を満たすことができた。軍用や産業用グレードの IMU を利用せず比較的安価な MEMS IMU を用いたことを考えると十分な成果だと考えられる。これまで推定してきた各推定精度についての評価を表 6 にまとめる。

表 6 推定精度評価

	使用センサ	評価	特徴
速度推定精度	IMU	×	バイアスによって誤差が蓄積
	Sonar	△	原因不明の飛びが発生
	IMU/Sonar	○	加速度を利用することで飛びを除去
方位推定精度	IMU(ZUPT)	△	ZUPTで取り切れないバイアスが残存
位置推定精度	IMU	×	方位・速度のバイアス蓄積によって大きな誤差が発生
	IMU/Sonar	○	速度は良好だが、方位性能に問題あり

第 5 章 結論

5.1 結論

本研究では GNSS が欠損した場合にドップラソナーと IMU を利用して推測航法を行い 1 時間の最大測位誤差 100[m] を目指した。結果的に条件付の ZUPT とカルマンフィルタを用いて累積誤差を 82 ~ 86[m] に抑えることに成功した。この誤差は GNSS と同等とまでは言えないものの民間グレードの IMU を用いた結果としては満足できる成果であり、より正確な KF 方位を利用した場合、GNSS より若干劣るものの、1 時間の累積誤差は約 30[m] に収まったことから、ドップラソナーを利用してカルマンフィルタの加速度を用いたドップラソナー速度の補正結果は良好であったといえる。しかし、本手法では方位推定精度を維持することが難しいことも明らかになった。ZUPT によって方位のバイアス蓄積を抑えることはできるが、旋回時に発生するスリップの分誤差が発生する。更に、緩旋回を行った場合 ZUPT に旋回中の角速度が含まれてしまって ZUPT の誤差が蓄積してしまうという問題がある。これらの方位誤差によって GNSS/IMU カルマンフィルタを利用できる場合と比較して倍以上の大きな誤差要因となっている。今後はどのようにこの方位誤差を取り除くかが大きな課題となると考えられる。

5.2 今後の課題

本手法の精度向上のためには、特に方位推定精度の向上を行う必要があると考える。そのための手法としてはどのようにバイアスの蓄積を防ぐかが重要であり、より精度の高い IMU に換装する。一般的な船舶に搭載されている舵角やジャイロコンパス等の各種センサデータを活用する。船体運動力学の導入によるスリップ角の推定と補正を行う。方位推定のみによる推測航法ではなく姿勢推定を含めた慣性航法計算の導入によって測位精度を向上させるといった方法が考えられる。また、本手法では初期バイアスが正しいことが前提となっているため、どの様に正しい初期バイアスを求めて設定するかも課題となってくる。例えば、GNSS が利用できる間に初期バイアスを変えて並列計算を行い、その累積誤差を比較して最も小さくなった値を利用する等が考えられる。

参考文献

- (1) 国土交通省海事局：自動運航船舶に関する現状等，国土交通省海事局，
<https://www.mlit.go.jp/common/001215815.pdf>, 2017. 12.
- (2) 国土交通省：海事産業の生産性革命の深化のために推進すべき取組について, 2019. 6. 1
- (3) 日本郵船：, https://www.nyk.com/news/2019/20190930_01.html, 2019. 9. 30.
- (4) 商船三井： <https://www.mol.co.jp/pr/2019/19099.html>, 2019. 12.
- (5) C4ADS: ABOVE US ONLY STARS Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria,
<https://static1.squarespace.com/static/566ef8b4d8af107232d5358a/t/5c99488beb39314c45e782da/1553549492554/Above+Us+Only+Stars.pdf>, 2020. 9. 18
- (6) 渡辺弘幸:GNSS と IMU 及びドップラソナーの統合について, 東京海洋大学卒業論文, 2019
- (7) IMO: Resolution A.953(23) WORLD-WIDE RADIONAVIGATION SYSTEM,
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.953\(23\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.953(23).pdf), 2020. 10.
- (8) 石井春雄他：ドップラーログを利用した流速測定，水路部研究報告，1986. 3
- (9) 陳 迪晗：複数のセンサーを利用した GNSS の性能向上に関する研究,
http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/jp/assets/files/pdf/content1/2011chin_ms.pdf ,
2020. 7. 23.

図表リスト

図 1 “みちびき”を利用した波高計測ブイ	1
図 2 プレジャーボートの自動着栈	2
図 3 sps855	4
図 4 NetR9	4
図 5 GNSS 誤差要因	5
図 6 静止状態で RTK を行ったばあいの測位精度	6
図 7 CSM Mg-100	7
図 8 IMU 設置軸	8
図 9 静止状態でのバイアス補正	9
図 10 蓄積誤差の低減	9
図 11 角速度 ZUPT フローチャート	11
図 12 60 秒移動平均	12
図 13 ドップラソナー表示板	13
図 14 IMU 速度+IMU 方位 (組み合わせ 1)	19
図 15 Sonar 速度+IMU 方位 (組み合わせ 2)	19
図 16 SoNAR/IMU 速度+IMU 方位 (組み合わせ 3)	19
図 17 汐路丸研究室での設置作業の様子	20
図 18 ドップラソナー録画用の三脚設置状況	21
図 19 航程プロット	22
図 20 角速度の補正	23
図 21 IMU-GNSS 方位差分と方位変化プロット	24
図 22 IMU 速度と GNSS 速度比較	25
図 23 ドップラソナーとカルマンフィルタ速度比較	25
図 24 速度差比較	26
図 25 水平誤差	27
図 26 水平誤差 拡大図	27
図 27 X 方向誤差	28
図 28 Y 方向誤差	28
図 29 GNSS 速度+KF 方位 (組み合わせ 4)	29
図 30 Sonar 速度+KF 方位 (組み合わせ 5)	29
図 31 Sonar/IMU 速度+KF 方位 (組み合わせ 6)	29
図 32 KF 方位を利用した場合の水平誤差	30
図 33 X 方向誤差	30
図 34 Y 方向誤差	31
図 35 従来手法との比較	32
図 36 従来手法との比較 (方位)	32
図 37 初期バイアスを増減させた場合の累積誤差変化	33
図 38 ZUPT のエラーチェック値を変更した場合	34

謝辞

本研究にあたっては東京海洋大学 久保信明教授、福田巖准教授に GNSS と慣性航法の専門家として様々なご指導ご助言をいただきました。ありがとうございました。また、数時間分あるドップラソナーの録画映像を手作業でデータ化作業にあたってくれた昨年度卒業生の渡辺弘幸君、実際の実験作業で補助を行ってくれた同期の青木恭平君に感謝の意を表します。